



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM KLORIDA DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* LARUTAN EUTEKTIK
GARAM KLORIDA/H₂O UNTUK *COLD STORAGE*
BERBASIS *PHASE CHANGE MATERIAL***

ANAM AROFI
NRP. 2712 100 047

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng
Dr. Diah Susanti, S.T , M.T

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM KLORIDA DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* LARUTAN EUTEKTIK
GARAM KLORIDA/H₂O UNTUK *COLD STORAGE*
BERBASIS *PHASE CHANGE MATERIAL***

ANAM AROFI
NRP. 2712 100 047

Dosen Pembimbing
Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng
Dr. Diah Susanti, S.T. M.T

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TL 141584

**THE EFFECT OF CHLORIDE SALT COMPOSITION
AND NUCLEATING AGENT ADDITION TO
SUPERCOOLING DEGREE OF EUTECTIC SOLUTION
CHLORIDE SALT/H₂O FOR COLD STORAGE BASED
ON PHASE CHANGE MATERIAL**

**ANAM AROFI
NRP. 2712 100 047**

**Advisor
Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng
Dr. Diah Susanti, S.T. M.T**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**

**PENGARUH KOMPOSISI GARAM KLORIDA DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* LARUTAN EUTEKTIK
GARAM KLORIDA/H₂O UNTUK *COLD STORAGE*
BERBASIS *PHASE CHANGE MATERIAL***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ANAM AROFI
NRP. 2712 100 047

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng (Pembimbing I)
2. Dr. Diah Susanti, S.T. M.T (Pembimbing II)

SURABAYA

Januari 2016



**PENGARUH KOMPOSISI GARAM KLORIDA DAN
PENAMBAHAN AGEN NUKLEASI TERHADAP
DERAJAT *SUPERCOOLING* LARUTAN EUTEKTIK
GARAM KLORIDA/H₂O UNTUK *COLD STORAGE*
BERBASIS *PHASE CHANGE MATERIAL***

Nama Mahasiswa : Anam Arofi
NRP : 2712100047
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng
Dr. Diah Susanti, S.T. M.T

ABSTRAK

Larutan eutektik air dan garam umumnya digunakan sebagai *Phase Change Material* untuk *cold storage*. Namun dalam penerapannya, larutan ini memiliki masalah pada ketidaksempurnaan proses pembekuan yang terjadi karena adanya *supercooling*. Dalam penelitian ini dilakukan pembekuan larutan air dan garam dengan variasi komposisi dan penambahan agen nukleasi. Jenis garam klorida yang digunakan adalah NaCl, MgCl₂, dan NH₄Cl. Variasi komposisi garam klorida yang digunakan adalah 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, 6 wt% dan 8 wt%. Agen nukleasi yang digunakan adalah boraks dengan variasi penambahan 1 wt%, 2wt% dan 3 wt%. Proses pengujian yang dilakukan adalah *chamber test*. Dari hasil penelitian terlihat bahwa komposisi garam klorida memberikan pola pengaruh yang berbeda terhadap derajat *supercooling* dan berkisar pada 0 – 5 °C. Selain itu penambahan 1 wt% agen nukleasi pada NaCl/H₂O tercatat memberikan penurunan derajat *supercooling* sebesar 0,87°C. Namun penambahan agen nukleasi pada MgCl₂/H₂O dan NH₄Cl/H₂O tercatat justru memberikan kenaikan derajat *supercooling* sebesar 1 – 2 °C.

Kata kunci: Agen Nukleasi, Cold Storage, Derajat Supercooling, Garam Klorida, Phase Change Material.

THE EFFECT OF CHLORIDE SALT COMPOSITION AND NUCLEATING AGENT ADDITION TO SUPERCOOLING DEGREE OF EUTECTIC SOLUTION CHLORIDE SALT/H₂O FOR COLD STORAGE BASED ON PHASE CHANGE MATERIAL

Student Name : Anam Arofi
NRP : 2712100047
Departement : Materials and Metallurgical Engineering FTI-ITS
Advisor : Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng
Dr. Diah Susanti, S.T. M.T

ABSTRACT

Eutectic solution of water and salt is generally used as a Phase Change Material for cold storage. But in practice, this solution often has problems with imperfections process of freezing that occurs because of the phenomenon of supercooling. In this research, the process of freezing a solution of water and salt with a variation of the composition and the addition of a nucleating agent were done. The type of chloride salts used are NaCl, MgCl₂, and NH₄Cl. Variations composition of chloride salts are 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, 6 wt% and 8 wt%. Nucleating agent used is borax with 1 wt%, 2 wt% and 3 wt% in addition. The testing process is chamber test. From the research it appears that the composition of chloride salts provide different patterns to the degree of supercooling in the range 0-5 °C. Besides that, the addition of 1 wt% nucleating agent in NaCl/H₂O gives a reduction in the degree of supercooling in the amount of 0,87°C. But addition to MgCl₂/H₂O and NH₄Cl/H₂O gives a rising in the degree of supercooling at 1-2°C.

Keywords: Cold Storage, Degree of Supercooling, Nucleating Agent, Phase Change Material, Salt Chloride

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanah Wa Ta'ala karena atas segala limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Sholawat serta salam tidak lupa penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi Wassallam atas suri tauladan dalam kehidupan ini.

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Birsono dan Ibu Sriken Tulastari sebagai kedua orang tua tersayang.
2. Mbak Reni Retnowati dan Mas Supeno Rulik sebagai kedua kakak tercinta.
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. sebagai dosen pembimbing,
4. Ibu Dr. Diah Susanti, ST., M.T. sebagai dosen co-pembimbing,
5. Mas Febryn dan kawan-kawan Laboratorium Pengukuran Fisis Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik demi penyempurnaan riset dalam bidang ini ke depannya.

Penulis juga berharap Tugas Akhir ini dapat menjadi referensi riset pembuka di Indonesia tentang *Phase Change Material* (PCM) khususnya untuk aplikasi pada *Cold Storage*. Atas perhatian dan kerjasama dari semua pihak kami menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Surabaya, 21 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Permasalahan	2
I.3 Batasan Masalah	2
I.4 Tujuan	3
I.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Thermal Energy Storage (TES)	5
II.1.1 Panas <i>Sensible</i>	5
II.1.2 Panas Laten Perubahan Padat-Cair	6
II.2 Sifat Koligatif Air	10
II.3 Larutan Eutektik Air dan Garam	11
II.3 Garam Ammonium Klorida (NH_4Cl)	15
II.3.1 Sifat Fisis	15
II.3.2 Sifat Termokimia NH_4Cl	15
II.3.3 Diagram Fasa Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	16
II.7 Garam Magnesium Klorida (MgCl_2)	17
II.7.1 Sifat Fisis	17
II.7.2 Sifat Termokimia	17
II.7.3 Diagram Fasa Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$	17
II.8 Garam Natrium Klorida (NaCl)	18
II.8.1 Sifat Fisis	18
II.8.2 Sifat Thermokimia	18
II.8.3 Diagram Fasa Larutan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$	19
II.4 Fenomena <i>Supercooling</i>	20

II.9 Penelitian Sebelumnya.....	21
BAB III METODOLOGI	23
III.1 Alat	23
III.2 Bahan.....	25
III.3 Diagram Alir Penelitian.....	27
III.4 Metode Penelitian.....	30
III.5 Prosedur Penelitian.....	30
III.6 Rancangan Penelitian	36
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	39
IV.1 Analisis Hasil <i>Chamber Test</i> Larutan Eutektik Garam Klorida/H ₂ O dengan Variasi Komposisi Garam Klorida	39
IV.2 Analisis Hasil <i>Chamber Test</i> Larutan Eutektik Garam Klorida/H ₂ O dengan Penambahan Agen Nukleasi	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
V.1 Kesimpulan.....	81
V.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA.....	xxi
LAMPIRAN	xxv
BIODATA PENULIS.....	xxxiii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Metode untuk Penyimpanan Panas dan Dingin (Mehling, 2008).....	5
Gambar 2.2 Perbandingan Panas <i>Sensible</i> yang disimpan terhadap Kenaikan Temperatur (Mehling, 2008).....	6
Gambar 2.3 Penyimpanan Panas sebagai Panas Laten untuk Perubahan Fasa Padatan-Cair (Mehling, 2008).....	7
Gambar 2.4 Klasifikasi dari Beberapa Jenis Aplikasi Penyimpanan Dingin di Bawah 0°C (Li <i>et al</i> , 2013).....	10
Gambar 2.5 Diagram Fasa untuk Larutan Eutektik Air-Garam (Gang <i>et al</i> , 2013)	13
Gambar 2.6 Diagram Fasa untuk Larutan NH ₄ Cl/H ₂ O pada tekanan konstan (Amir dkk, 2006).....	16
Gambar 2.7 Diagram Fasa untuk Larutan MgCl ₂ /H ₂ O (Kipouros dkk, 2006)	18
Gambar 2.8 Diagram Fasa untuk Larutan NaCl/H ₂ O (Couper dkk, 2012)	19
Gambar 2.9 Pengaruh <i>Supercooling</i> pada Penyimpanan Panas. Kiri: dengan sedikit <i>Supercooling</i> dan nukleasi. Kanan: <i>Supercooling</i> berlebihan tanpa terjadi nukleasi.....	20
Gambar 3.1 <i>Freezer</i>	23
Gambar 3.2 (a) <i>Temperature Data Logger</i> (b) Thermometer APPA 55.....	24
Gambar 3.3 Neraca Digital.....	25
Gambar 3.4 Tabung Logam.....	25
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian (Keseluruhan).....	27
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian (A)	28
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian (B)	29
Gambar 3.8 Proses Penimbangan Serbuk Garam.....	30
Gambar 3.9 Proses Memasukkan Serbuk Garam.....	31
Gambar 3.10 Proses Memasukkan Larutan H ₂ O.....	31
Gambar 3.11 Proses <i>Stirring</i> Larutan.....	32
Gambar 3.12 Rancangan Eksperimen oleh Ming Liu <i>et al</i> (2006).....	33

Gambar 3.13 Data Hasil Eksperimen oleh Ming Liu <i>et al</i> (2006)	33
Gambar 3.14 Skema Eksperimen	34
Gambar 3.15 Posisi Peletakan Tabung Logam.....	35
Gambar 3.16 Proses Pengujian.....	35
Gambar 4.1 Kurva Pendinginan 0 wt% NaCl+ 100 wt% H ₂ O ..	40
Gambar 4.2 Kurva Pendinginan 2 wt% NaCl+ 98 wt% H ₂ O	41
Gambar 4.3 Kurva Pendinginan 4 wt% NaCl+ 96 wt% H ₂ O	42
Gambar 4.4 Kurva Pendinginan 6 wt% NaCl+ 94 wt% H ₂ O	43
Gambar 4.5 Kurva Pendinginan 8 wt% NaCl+ 92 wt% H ₂ O	44
Gambar 4.6 Kurva Pendinginan 0 wt% MgCl ₂ + 100 wt% H ₂ O	47
Gambar 4.7 Kurva Pendinginan 2 wt% MgCl ₂ + 98wt% H ₂ O ..	48
Gambar 4.8 Kurva Pendinginan 4 wt% MgCl ₂ + 96 wt% H ₂ O .	49
Gambar 4.9 Kurva Pendinginan 6 wt% MgCl ₂ + 94 wt% H ₂ O ..	50
Gambar 4.10 Kurva Pendinginan 8 wt% MgCl ₂ + 92 wt% H ₂ O	51
Gambar 4.11 Kurva Pendinginan 0 wt% NH ₄ Cl +100 wt% H ₂ O	54
Gambar 4.12 Kurva Pendinginan 2 wt% NH ₄ Cl + 98 wt% H ₂ O	55
Gambar 4.13 Kurva Pendinginan 4 wt% NH ₄ Cl + 96 wt% H ₂ O	56
Gambar 4.14 Kurva Pendinginan 6 wt% NH ₄ Cl + 94 wt% H ₂ O	57
Gambar 4.15 Kurva Pendinginan 8 wt% NH ₄ Cl + 92 wt% H ₂ O	58
Gambar 4.16 Derajat <i>Supercooling</i> Larutan Garam Klorida/H ₂ O di setiap Variasi Komposisi Garam Klorida.....	61
Gambar 4.17 Kurva Pendinginan 1 wt% Boraks + 99 wt% Larutan NaCl/H ₂ O	64
Gambar 4.18 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan NaCl/H ₂ O	65
Gambar 4.19 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan NaCl/H ₂ O	66
Gambar 4.20 Kurva Pendinginan 1 wt% Boraks + 99 wt% Larutan MgCl ₂ /H ₂ O	69

Gambar 4.21 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$	70
Gambar 4.22 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	71
Gambar 4.23 Kurva Pendinginan 1 wt% Boraks + 99 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	74
Gambar 4.24 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	75
Gambar 4.25 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	76
Gambar 4.26 Derajat <i>Supercooling</i> Larutan 2 wt% Garam Klorida + 98 wt% H_2O Setelah Penambahan Agen Nukleasi	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Thermal dari Larutan Eutektik Air-Garam (Zheng dan Wu, 2002).....	14
Tabel 2.2 Sifat Termokimia pada Ammonium Klorida.....	15
Tabel 2.3 Sifat Termokimia pada Magnesium Klorida.....	17
Tabel 2.4 Sifat Termokimia pada Natrium Klorida.....	19
Tabel 2.5 Penelitian Sebelumnya.....	21
Tabel 3.1 Data Hasil Kalibrasi.....	24
Tabel 3.2 Spesifikasi NaCl.....	25
Tabel 3.3 Spesifikasi $MgCl_2$	26
Tabel 3.4 Spesifikasi NH_4Cl	26
Tabel 3.5 Spesifikasi Boraks.....	26
Tabel 3.6 Rancangan Penelitian.....	36
Tabel 4.1 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NaCl/ H_2O dengan Variasi Komposisi.....	45
Tabel 4.2 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $MgCl_2$ / H_2O dengan Variasi Komposisi.....	52
Tabel 4.3 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NH_4Cl / H_2O dengan Variasi Komposisi.....	59
Tabel 4.4 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NaCl/ H_2O setelah Penambahan Agen Nukleasi.....	67
Tabel 4.5 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $MgCl_2$ / H_2O setelah Penambahan Agen Nukleasi.....	72
Tabel 4.6 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NH_4Cl / H_2O setelah Penambahan Agen Nukleasi.....	77





BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Phase Change Material (PCM) adalah jenis material penyimpan energi yang menggunakan prinsip panas laten saat material berubah fasa dari cair ke solid ataupun sebaliknya. Proses penyerapan atau pelepasan energi pada PCM terjadi pada temperatur yang relatif konstan sehingga membuatnya lebih baik dibandingkan dengan *Sensible Heat Storage* (SHS). Hal ini terjadi karena PCM umumnya memiliki nilai panas laten yang tinggi (Sarma dkk, 2007). Dua hal penting inilah yang menjadikan PCM digunakan secara komersial di berbagai bidang.

Pada tugas akhir ini, penulis memfokuskan riset PCM untuk penggunaan pada *cold storage*. *Cold storage* pada umumnya menggunakan pendingin berbasis energi listrik secara terus menerus untuk menjaga produk seperti makanan dalam keadaan dingin. Tentu banyak energi yang diperlukan dan bahkan biaya yang cukup besar untuk menggunakan pendingin jenis ini. Dengan bahan PCM, hal tersebut dapat diminimalisasi. Salah satunya konsepnya adalah dengan menggunakan sistem *hybrid* pada pendingin tersebut sehingga energi listrik hanya digunakan untuk membekukan bahan PCM ketika sebelum proses pendinginan produk dan ketika temperatur ruangan melewati temperatur batas tertentu. Pendinginan produk dilakukan oleh bahan PCM yang telah membeku tersebut sehingga energi yang digunakan dapat diminimalisasi (Liu, 2006).

Untuk aplikasi di bidang ini, diperlukan bahan PCM yang memiliki jangkauan temperatur beku di bawah 0° Celcius. Jenis PCM yang dipilih adalah larutan eutektik air dan garam karena pada beberapa penelitian hanya jenis ini yang dapat memberikan temperatur beku di bawah 0°C sesuai kebutuhan pada *cold storage*. Han dkk, 2006 meneliti preparasi larutan biner eutektik dari Natrium Klorida dan air. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa larutan tersebut dapat menghasilkan titik lebur mencapai -22°C .



Namun dalam penerapannya, larutan ini seringkali mengalami masalah tidak sempurnanya proses pembekuan yang terjadi sehingga menyebabkan tidak semua panas laten dilepaskan. Hal ini terjadi karena adanya fenomena *supercooling*. Fenomena pada zat cair ini terjadi ketika masih tersisa zat cair saat temperatur sudah berada di bawah titik bekunya (Tan dkk, 2014).

Penelitian ini akan melanjutkan studi tersebut dengan menganalisis pengaruh komposisi bahan garam dan penambahan agen nukleasi terhadap derajat *supercooling*. Bahan garam yang digunakan adalah beberapa bahan garam klorida antara lain NaCl, MgCl_2 dan NH_4Cl . Agen nukleasi yang ditambahkan adalah boraks.

I.2 Rumusan Permasalahan

Berdasar penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh komposisi NaCl, MgCl_2 dan NH_4Cl terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik NaCl/ H_2O , $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$?
2. Bagaimana pengaruh penambahan boraks sebagai agen nukleasi terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik NaCl/ H_2O , $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$?

I.3 Batasan Masalah

Untuk menganalisis masalah pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Pengotor pada larutan diabaikan.
2. Larutan dianggap homogen.
3. *Chamber* yang digunakan dianggap memiliki insulasi yang baik terhadap lingkungan luar.
4. Proses pendinginan pada *chamber* dianggap merata.
5. Posisi peletakan sampel uji saat *Chamber Test* dianggap tidak berpengaruh.
6. *Container* dan volume sampel saat pengujian dibuat sama.



I.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh komposisi NaCl , MgCl_2 dan NH_4Cl terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$.
2. Menganalisis pengaruh penambahan boraks sebagai agen nukleasi terhadap derajat *supercooling* larutan eutektik $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$.

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis derajat *supercooling* larutan eutektik garam klorida dan air dengan variasi komposisi tertentu. Pengaruh agen nukleasi terhadap larutan tersebut juga dilakukan dengan harapan dapat dijadikan analisis tambahan. Selain itu penelitian ini diharapkan juga dapat dijadikan sebagai penelitian awal khususnya di jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dan di dalam negeri pada umumnya terkait topik *Phase Change Material* khususnya dalam bidang *cold storage*.



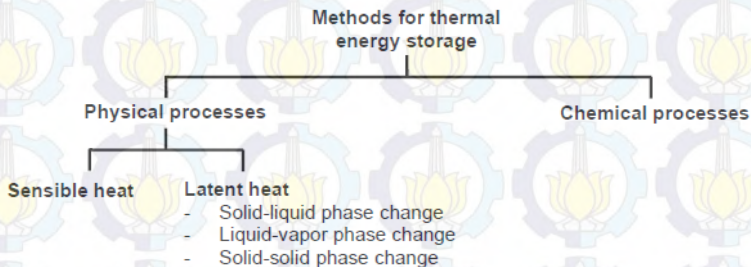
Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Thermal Energy Storage (TES)

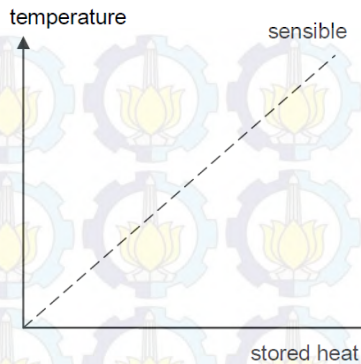
Thermal Energy Storage (TES) atau bisa disebut dengan *heat and cold storage*, menggunakan prinsip penyimpanan panas atau dingin untuk digunakan kemudian. Terdapat beberapa metode penyimpanan untuk membuatnya bersifat *reversible* yaitu dengan proses fisika dan kimia seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Metode untuk Penyimpanan Panas dan Dingin (Mehling, 2008)

II.1.1 Panas *Sensible*

Sistem paling umum untuk *Thermal Energy Storage* adalah dengan menggunakan prinsip panas *sensible*. Gambar 2.2 menunjukkan perubahan panas yang disimpan seiring naiknya temperatur. Perbandingan panas yang disimpan terhadap naiknya temperatur biasa disebut sebagai kapasitas panas dari media penyimpanan. Penyimpanan model ini biasanya digunakan dengan padatan seperti batu atau bata, atau cairan seperti air sebagai material penyimpan. Gas tidak digunakan untuk model ini karena memiliki kapasitas panas yang kecil. *Sensible heat storage* biasanya diaplikasikan untuk penyimpanan panas seperti pada pemanasan air pada alat rumah tangga (Mehling, 2008).

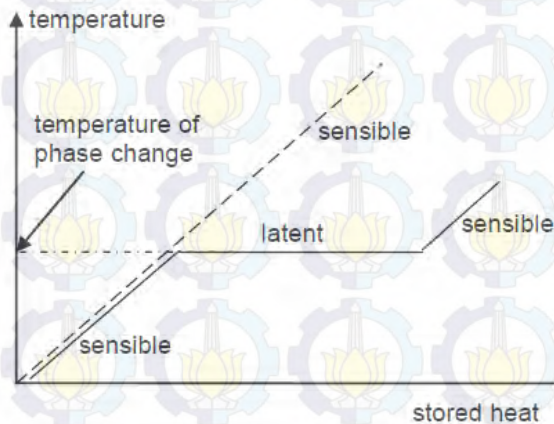


Gambar 2.2 Perbandingan Panas *Sensible* yang Disimpan terhadap Kenaikan Temperatur (Mehling, 2008)

II.1.2 Panas Laten Perubahan Padat-Cair

Apabila panas disimpan sebagai panas laten, perubahan fasa dari material penyimpanan yang digunakan. Ada beberapa opsi dengan keuntungan dan kerugiannya. Perubahan fasa padatan-cair dengan peleburan dan solidifikasi bisa menyimpan sejumlah panas atau dingin bila materialnya cocok. Peleburan dikarakterisasi dengan perubahan volume yang kecil biasanya kurang dari 10 persen. Bila wadah memiliki ukuran yang sesuai dengan perubahan volume tersebut maka tekanan tidak akan berpengaruh signifikan terhadap proses peleburan dan solidifikasi sehingga proses penyimpanan berlangsung dalam temperatur yang konstan. Ketika terjadi peleburan, sementara panas ditransferkan menjadi material penyimpanan, material akan tetap pada temperatur konstan yang disebut dengan temperatur *melting* atau *phase change temperature* seperti pada Gambar 2.3. Setelah peleburan selesai, transfer panas kembali menjadi penyimpanan panas dengan panas *sensible*. Panas yang dibutuhkan ketika proses peleburan disebut sebagai panas laten dan prosesnya disebut sebagai *Latent Heat Storage*. Karena perubahan volume sangat kecil maka panas yang disimpan sama dengan perubahan entalpinya atau biasa disebut dengan *heat of*

fusion. Material dengan perubahan fasa padatan-cair dimana cocok digunakan sebagai penyimpan panas atau dingin biasanya disebut sebagai *latent heat storage material* atau lebih mudahnya disebut sebagai *Phase Change Material (PCM)*.



Gambar 2.3 Penyimpan Panas sebagai Panas Laten untuk Perubahan Fasa Padatan-Cair (Mehling, 2008)

Phase Change Material (PCM) adalah salah satu jenis material penyimpan energi yang menggunakan prinsip panas laten dari proses solidifikasi atau pelelehan. Material jenis ini akan menyimpan energi panas ketika berubah fasa dari padat ke cair, dari cair ke gas ataupun dari padat ke padat. Kemudian material ini akan melepaskan energi panas ketika fasa berubah sebaliknya. Tidak seperti material *Sensible Heat Storage (SHS)*, PCM akan menyerap atau melepas energi panas pada temperatur yang relatif konstan. Selain itu PCM juga menyimpan energi panas per unit volume 5-14 kali lipat lebih tinggi daripada material SHS seperti air, batu dan lainnya. PCM digunakan sebagai penyimpan energi karena memiliki beberapa sifat yang penting seperti dari segi sifat panasnya yaitu memiliki temperatur transisi yang tepat, transisi panas laten yang tinggi dan kemampuan mentransfer panas yang



cukup baik. Dari segi sifat fisisnya, PCM memiliki fasa yang lebih ekuilibrium, densitas yang lebih tinggi, perubahan volume yang rendah dan tekanan uap air yang rendah. Dari segi sifat kinetik, PCM tidak bisa mengalami *supercooling* dan laju kristalisasi yang cukup. Kemudian dari segi sifat kimianya PCM termasuk material dengan stabilitas kimia yang cukup baik dalam jangka waktu yang lama, cocok untuk material bangunan, tidak beracun serta tidak menimbulkan kebakaran. Terakhir dari segi keekonomian, ketersediaan material jenis ini cukup melimpah dan lebih efektif dalam harga (Sarma dkk, 2007).

PCM memiliki beberapa sifat termofisik, kinetik, kimia dan lainnya sebagai berikut :

1. Sifat *Thermal*

PCM memiliki kelebihan berikut dari segi ketahanan *thermal* antara lain temperatur transisi fasa yang cocok digunakan untuk berbagai aplikasi, panas laten transisi yang tinggi dan perpindahan panas yang baik. Saat memilih PCM untuk aplikasi tertentu, temperatur operasi dari pemanasan atau pendinginan perlu disesuaikan dengan temperatur transisi PCM itu sendiri. Panas laten harus disesuaikan setinggi mungkin khususnya pada basis volumetrik untuk meminimalisasi ukuran fisis dari penyimpanan panas. Konduktivitas panas yang tinggi juga mempengaruhi proses pengisian dan pelepasan dari penyimpanan energi.

2. Sifat Fisis

Dari segi fisis, PCM memiliki sifat antara lain fasa ekuilibrium yang baik, densitas yang tinggi, perubahan volume yang kecil dan memiliki tekanan uap air yang rendah. Kestabilan fasa selama proses pembekuan dan peleburan akan membantu pengaturan penyimpanan panas dan densitas yang tinggi bertujuan untuk memberikan ukuran yang kecil dari kontainer penyimpanan. Perubahan volume yang kecil saat transformasi fasa dan tekanan uap air yang kecil pada temperatur operasi berfungsi untuk mengurangi masalah pengisian.



3. Sifat Kinetik

Dari sifat kinetik, PCM memiliki sifat antara lain tanpa *supercooling* dan laju kristalisasi yang cukup baik. *Supercooling* sendiri telah menjadi aspek permasalahan pada pengembangan PCM secara khusus untuk hidrat garam. *Supercooling* lebih dari beberapa derajat akan mengganggu dengan ekstraksi panas yang wajar dari media penyimpanan dan sekitar 5-10 °C dari *Supercooling* bisa mencegahnya masuk.

4. Sifat Kimiawi

Dari sifat kimiawi, PCM memiliki sifat antara lain memiliki kestabilan kimiawi yang lama, cocok untuk material konstruksi, tidak beracun dan tidak memiliki bahaya kebakaran. PCM dapat memberikan gejala degradasi dengan menghilangkan air dari hidrasi, dekomposisi kimia atau ketidakcocokan dengan material konstruksi. PCM harus tidak beracun, tidak mudah terbakar dan tidak mudah meledak untuk keamanannya.

5. Sifat Ekonomis

Dari sifat ekonomis, PCM memiliki sifat antara lain jumlahnya yang berlimpah, tersedia dan harga yang efektif. Harga yang murah dan ketersediaan dalam jumlah besar dari PCM adalah hal yang sangat penting dalam pengembangannya (Sarma dkk, 2007).

Beberapa material PCM yang komersial adalah berdasar dari material dengan kelas hidrat garam, parafin dan larutan eutektik air dan garam. Material tersebut biasanya tidak identik dengan materialnya. Sebagai contoh pada hidrat garam, bahkan hingga komposisi diubah, sebuah nukleator ditambahkan, material akan menebal atau menjadi *gel* sehingga dapat disebut bahwa PCM adalah campuran dari material dasar yang berbeda. PCM komersial biasanya meliputi jangkauan temperatur dari -40°C hingga +20°C. Walaupun banyak material telah diinvestigasi untuk temperatur yang lebih tinggi namun material tersebut belum tersedia secara komersial karena tidak ada pasar yang membutuhkannya (Milisic, 2013)



PCM memiliki keuntungan yaitu panas fusi yang tinggi dan perubahan fasa yang cocok untuk jangkauan temperatur pada aplikasi penyimpanan dingin. Aplikasinya seperti pada Gambar 2.4 berikut.

0	Cold air distribution, railway cold storage transportation logistics, fermentation of beer industry, ski resort
-25	Frozen food transportation and preservation, liquefaction of petroleum gas (propane, etc)
-50	Freezing process of working faces of mines
-75	Low temperature climatic chamber, production process of dry ice (CO ₂)
-100	Liquefaction of ethane and ethylene, cryomedicine, cryobiology
-125	
-150	Liquefaction natural gas
-175	
-200	Air liquefaction and separation, noble gas separation, synthetic gas separation, hydrogen and argon reduction, liquid oxygen and liquid ammonia application, low temperature space environment simulation (heat sink)
-225	
-250	Liquefaction of neon and hydrogen, simulation of space shuttle vacuum environment chamber (helium and cryopump)
-275	Superconductivity, liquefaction of helium

Gambar 2.4. Klasifikasi dari Beberapa Jenis Aplikasi Penyimpanan Dingin di Bawah 0°C (Li et al, 2013)

II.2 Sifat Koligatif Air

Terdapat empat sifat koligatif spesial dari air ketika ditambahkan beberapa bahan dan dilarutkan dalam pelarut air. Sifat yang dimunculkan juga dapat diprediksi bila jumlah partikel terlarut diketahui. Empat sifat koligatif ini antara lain tekanan uap (ketika air pada keadaan setimbang dengan uapnya sendiri), tekanan osmosis (tekanan mengontrol difusi dari pelarut yang melalui membran semipermeabel), titik didih (temperatur dimana air berubah fasa menjadi gas) dan titik beku (temperatur dimana air berubah fasa menjadi padat). Empat hal tersebut akan terpengaruh ketika kita menambahkan sejumlah partikel terlarut seperti gula atau garam pada satu liter air murni, akan ada beberapa



konsekuensinya. Tekanan uap akan turun sedangkan tekanan osmosis akan naik. Titik didih akan berelevasi sedikit di atas titik didih normal 100,0 °C. Begitupun untuk titik bekunya. Titik beku air dengan penambahan bahan-bahan tersebut akan turun di bawah titik beku air normal 0,0°C. Penurunan titik beku ini juga dinamakan sebagai *freezing-point depression*. Hal ini aplikasikan khususnya pada daerah bersalju. Ketika jalan dipenuhi dengan es dan salju maka garam ditaburkan pada daerah tersebut agar pada temperatur tersebut air tetap mencair (Stewart, 2009).

Terkait *freezing-point depression*, penurunan titik beku dapat dinyatakan ke dalam persamaan 2.1 berikut :

$$\Delta T_f = K_{f,1} m_2 \quad (2.1)$$

dimana m_2 adalah molalitas zat terlarut. Kuantitas $K_{f,1}$ disebut sebagai *freezing point depression constant* untuk pelarut spesifik. Nilai ini juga dapat dihasilkan dari persamanaan 2.2 berikut :

$$K_{f,1} = \frac{M_1 R T_m^2}{\Delta_{fus} H_{m,1}} \quad (2.2)$$

Freezing point depression constant ($K_{f,1}$) memiliki nilai yang berbeda untuk masing-masing pelarut tetapi tidak bergantung terhadap zat terlarut. Bila ada zat terlarut tertentu, m_2 digantikan dengan sejumlah molalitas dari semua zat terlarut tersebut. Bila zat terlarut terdisosiasi atau terionisasi, total molalitas dari semua spesies zat terlarut harus digunakan, walaupun demikian pasangan ion juga perlu dihitung. Penurunan titik beku bisa digunakan untuk menghitung ionisasi dari elektrolit lemah (Mortimer, 2008).

II.3 Larutan Eutektik Air dan Garam

Campuran eutektik terdiri dari dua atau lebih komponen dimana masing-masing komponen tersebut saling melebur atau membeku secara kongruen membentuk suatu campuran yang kemudian membentuk kristal selama proses kristalisasi. Biasanya,

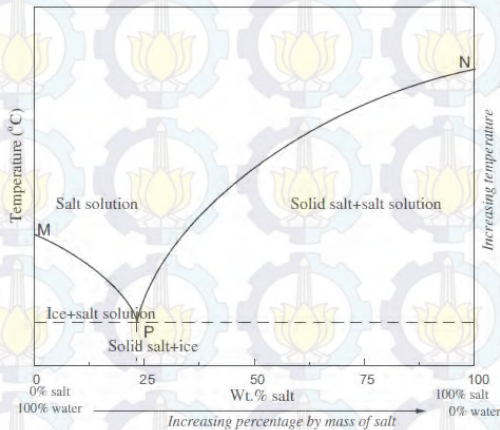


eutektik melebur dan membeku tanpa segregasi. Selama proses peleburan, kedua komponen melebur pada saat yang bersamaan tanpa ada kemungkinan pemisahan (Milisic, 2013). Campuran eutektik akan membentuk campuran dengan titik lebur yang rendah. Campuran ini menawarkan substansi untuk mengembangkan material terampil dan biasanya lebih murah tanpa mengkonsumsi waktu bila dibandingkan dengan pengembangan material baru. Titik lebur dari campuran ini akan lebih rendah dari masing-masing titik lebur komponennya. Sebagai contoh, perubahan material seperti timah dan timbal menjadi eutektik logam adalah cara umum untuk membuat titik leburnya lebih rendah dibanding bila menggunakan *soldering* (Kanchanomai, et al., 2002). Contoh lain campuran eutektik adalah Natrium Klorida dan air yang memiliki titik eutektik $-21,2^{\circ}\text{C}$ (Chen dkk, 2005). Campuran ini digunakan untuk memproduksi es dengan temperatur yang lebih rendah. Campuran eutektik lebih sederhana untuk disiapkan. Komponennya dapat dengan mudah dicampurkan dan dikonversi tanpa proses purifikasi. Baru-baru ini, campuran eutektik digunakan untuk memproduksi cairan ion yang dapat digunakan sebagai *green solvent* (Hou dkk, 2008).

Mayoritas riset PCM difokuskan pada larutan eutektik air dan garam karena larutan ini memiliki panas fusi yang tinggi dan jangkauan perubahan temperatur fasanya yang sesuai. Secara umum, titik beku dari air akan turun ketika garam ditambahkan pada air. Dengan tambahan garam, titik bekunya akan semakin turun, tetapi larutan eutektik air dan garam tidak akan membeku dari kondisi cairan murni menjadi kondisi padat. Untuk menjelaskan hal ini, diagram fasa dari larutan ini ditunjukkan pada Gambar 2.5. Titik beku pada 0°C ketika komposisinya adalah 100 % air. Dengan tambahan garam, titik beku larutan air dan garam akan berkurang. Di bawah situasi ini, hanya air murni saja yang membeku sedangkan garam akan tersisa pada larutan. Dengan tambahan garam, titik beku akan menurun hingga titik eutektik (titik P). Titik eutektik adalah titik beku terendah yang dapat dicapai. Pada titik ini, baik garam dan air akan membeku dan



komposisi dari material beku ini adalah sama dengan larutannya. Dengan tambahan garam, temperatur beku larutan akan mulai bertambah dan presipitat garam anhidrous akan keluar pada pembekuan. Di bawah konsentrasi garam tertentu (titik P), larutan akan membeku dan meleleh secara sempurna dari cairan/padatan menjadi padatan/cairan pada temperatur konstan (titik P) sementara proses pelepasan dan penyimpanan sejumlah besar energi terjadi. Jenis PCM yang demikian disebut sebagai larutan eutektik air dan garam (Gang dkk, 2013).



Gambar 2.5. Diagram fasa untuk larutan eutektik air-garam
(Gang dkk, 2013)

Zheng dan Wu (2002) memberikan karakteristik thermal dari larutan eutektik air – garam pada beberapa tingkatan perbedaan temperatur mulai dari -62°C hingga $-1,6^{\circ}\text{C}$ seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.



Tabel 2.1 Karakteristik Thermal dari Larutan Eutektik Air-Garam
(Zheng dan Wu, 2002)

PCM	Wt.% of salt	Phase Change Temperature (°C)	Fusion Heat (kJ/kg)
ZnCl ₂ /H ₂ O	51	-62	116,84
FeCl ₃ /H ₂ O	33,1	-55	155,52
CaCl ₂ /H ₂ O	29,8	-55	164,93
CuCl ₂ /H ₂ O	36	-40	166,17
K ₂ CO ₃ /H ₂ O	39,6	-36,5	165,36
MgCl ₂ /H ₂ O-1	17,1	-33,6	221,88
Al(NO ₃) ₃ /H ₂ O	30,5	-30,6	207,63
Mg(NO ₃) ₂ /H ₂ O	34,6	-29	186,93
Zn(NO ₃) ₂ /H ₂ O	39,4	-29	169,88
NH ₄ F/H ₂ O	32,3	-28,1	187,83
NaBr/H ₂ O	40,3	-28	175,69
KF/H ₂ O	21,5	-21,6	227,13
NaCl/H ₂ O	22,4	-21,2	228,14
MgCl ₂ /H ₂ O-2	25	-19,4	223,1
(NH ₄) ₂ SO ₄ /H ₂ O	39,7	-18,5	187,75
NaNO ₃ /H ₂ O	36,9	-17,7	187,79
NH ₄ NO ₃ /H ₂ O	41,2	-17,35	186,29
Ca(NO ₃) ₂ /H ₂ O	35	-16	199,35
NH ₄ Cl/H ₂ O	19,5	-16	248,44
K ₂ HPO ₄ /H ₂ O	36,8	-13,5	197,79
Na ₂ S ₂ O ₃ /H ₂ O	30	-11	219,86
KCl/H ₂ O	19,5	-10,7	253,18
MnSO ₄ /H ₂ O	32,2	-10,5	213,07
NaH ₂ PO ₄ /H ₂ O	32,4	-9,9	214,25
BaCl ₂ /H ₂ O	22,5	-7,8	246,44
ZnSO ₄ /H ₂ O	27,2	-6,5	235,75
Sr(NO ₃) ₂ /H ₂ O	24,5	-5,75	243,15
KHCO ₃ /H ₂ O	16,95	-5,4	268,54
NiSO ₄ /H ₂ O	20,6	-4,15	258,61
Na ₂ SO ₄ /H ₂ O	12,7	-3,55	284,95
NaF/H ₂ O	3,9	-3,5	314,09
NaOH/H ₂ O	19	-2,8	265,98
MgSO ₄ /H ₂ O	19	-3,9	264,42



PCM	Wt.% of salt	Phase Change Temperature (°C)	Fusion Heat (kJ/kg)
Na ₂ CO ₃ /H ₂ O	5,9	-2,1	310,23
FeSO ₄ /H ₂ O	13,04	-1,8	286,81
CuSO ₄ /H ₂ O	11,9	-1,6	290,91

II.3 Garam Ammonium Klorida (NH₄Cl)

II.3.1 Sifat Fisis

Ammonium klorida merupakan serbuk putih granular atau kristal kubik tanpa warna, bersifat garam, tidak berbau, higroskopis, tidak meleleh tetapi sublimasi pada pemanasan 340°C, tekanan uap 48,75 torr pada 250°C dan 251,2 torr pada 300°C, dan massa jenisnya 1,5724 g/cm³ pada 25°C. Indek refraksi sebesar 1,642. Bahan jenis ini mudah terlarut dalam air, kelarutannya 229 gram dan 271 gram/liter larutan pada 0°C dan 20°C. Kelarutan akan turun pada logam alkali klorida dan HCl. Hal ini akan membuatnya temperaturnya juga turun. Selain itu bahan ini akan larut dalam alkohol (6 gram/liter pada 19°C) dan larut pada cairan NH₃, tetapi tidak larut dalam aseton atau lainnya.

II.3.2 Sifat Termokimia NH₄Cl

Ammonium klorida memiliki sifat termokimia sebagai berikut:

Tabel 2.2 Sifat Termokimia pada Ammonium Klorida

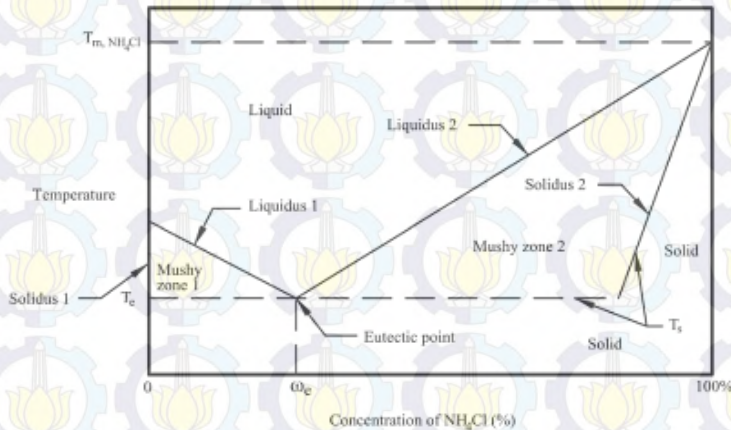
Sifat Termokimia	Nilai
$\Delta H_f^o (s)$	-75,15 kkal/mol
$\Delta H_f^o (s) [NH_3(g) + HCl(g)]$	-41,9 kkal/mol
$\Delta G_f^o (s)$	-48,51 kkal/mol
S^o	22,6 kal/derajat mol
C_p	20,1 kal/derajat mol
$\Delta H^o_{subl} (1 \text{ atm})$	39,6 kkal/mol

(Patnaik, 2002)



II.3.3 Diagram Fasa Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$

Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ memiliki diagram fasa seperti pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6. Diagram fasa untuk larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ pada tekanan konstan (Amir dkk, 2006)

Pada gambar tersebut, terdapat titik eutektik dimana nilai temperatur eutektiknya (T_e) = $-15,4^\circ\text{C}$ dan komposisi eutektiknya (ω_e) = $19,7\%$. Titik eutektik juga merupakan titik perpotongan dari dua garis *liquidus*, dimana di atas garis tersebut larutan berfasa *liquid*. Ketika temperatur di bawah titik eutektiknya atau berada pada temperatur yang di wilayah garis *solidus* kedua maka fasa padat terbentuk. Terdapat *mushy zones* dimana padat dan cair berada. *Mushy zone 1* adalah konsentrasi subeutektik dari larutan dalam kondisi cair ($\omega < \omega_e$) dan dibatasi oleh solidus 1, liquidus 1 dan garis eutektik. Fasa solid pada zona ini adalah es murni. Sedangkan pada *mushy zone 2* adalah konsentrasi supereutektik ($\omega > \omega_e$) dan dibatasi oleh liquidus 2, solidus 2 dan garis eutektik. Fasa solid yang terbentuk di zona ini adalah padatan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ (Amir dkk, 2006),



II.7 Garam Magnesium Klorida (MgCl_2)

II.7.1 Sifat Fisik

Garam anhidrat ini terdiri dari kristal heksagonal berwarna putih, indeks refraksi 1,675, densitas $2,32 \text{ g/cm}^3$, titik lebur pada 714°C , dekomposisi pada temperatur di bawah 300°C ketika dipanaskan lambat, melepaskan klorin, menguap pada 1412°C , kelarutan yang tinggi pada air (batas kelarutan $54,2 \text{ gram/100 mL}$ pada 20°C dan $72,7 \text{ gram/100 mL}$ pada 100°C) dan cukup larut pada etanol ($7,4 \text{ gram/100 mL}$ pada 30°C). Bentuk heksahidrat dari magnesium klorida memiliki karakteristik antara lain kristal monoklinik tidak berwarna, indeks refraksi 1,495, densitas $1,569 \text{ gram/cm}^3$, dekomposisi pada pemanasan 116°C , kelarutan yang tinggi pada air (157 gram/100 mL pada 20°C), kelarutan meningkat ketika dipanaskan dan larut dalam alkohol.

II.7.2 Sifat Termokimia

Magnesium Klorida memiliki sifat termokimia sebagai berikut :

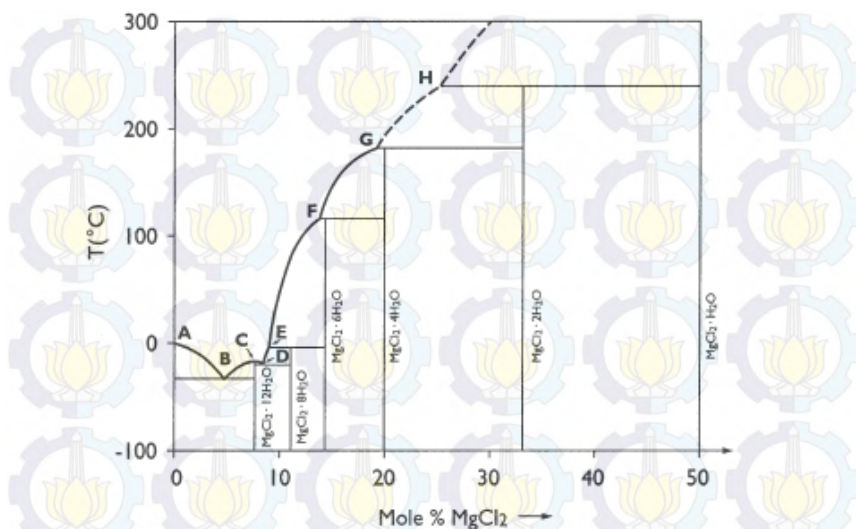
Tabel 2.3 Sifat Termokimia pada Magnesium Klorida

Sifat Termokimia	Nilai
$\Delta H_f^\circ (\text{MgCl}_2)$	-153,28 kkal/mol
$\Delta H_f^\circ (\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	-597,28 kkal/mol
$G_f^\circ (\text{MgCl}_2)$	-141,45 kkal/mol
$G_f^\circ (\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	-505,49 kkal/mol
$S^\circ (\text{MgCl}_2)$	21,42 kal/derajat mol
$S^\circ (\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	87,50 kal/derajat mol
$C_p (\text{MgCl}_2)$	17,06 kal/derajat mol
$C_p (\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$	75,30 kal/derajat mol

(Patnaik, 2002)

II.7.3 Diagram Fasa Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$

Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ memiliki diagram fasa seperti pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7. Diagram fasa untuk larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ (Kipourous dkk, 2006)

II.8 Garam Natrium Klorida (NaCl)

II.8.1 Sifat Fisis

Natrium Klorida berbentuk kristal granular atau serbuk. Kristal besarnya tidak berwarna, transparan dan berstruktur kubik. Bahan ini juga memiliki indeks refraksi 1,5422, densitas 2,165 g/cm^3 , titik lebur pada 801°C , menguap pada 1413°C , larut dalam air (batas kelarutan 35,7 gram/100 mL pada 0°C dan 39,1 gram/100 mL pada 100°C), larut dalam gliserol, larut dalam etilen glycol dan membentuk asam. Dalam methanol memiliki kelarutan 1,49 gram/100 mL), pada amonia cair memiliki kelarutan 2,15 gram/100 mL) dan tidak larut dalam asam hidroklorida.

II.8.2 Sifat Termokimia

Natrium Klorida memiliki sifat termokimia sebagai berikut :

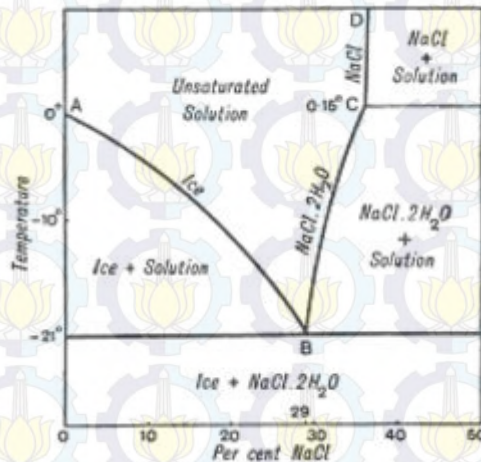
**Tabel 2.4** Sifat Termokimia pada Natrium Klorida

Sifat Termokimia	Nilai
ΔH_f° (cry)	-98,27 kkal/mol
ΔH_f° (gas)	-42,22 kkal/mol
G_f° (cry)	-91,82 kkal/mol
G_f° (gas)	-47,00 kkal/mol
S° (cry)	17,24 kal/derajat mol
S° (gas)	54,90 kal/derajat mol
C_p (cry)	12,07 kal/derajat mol
C_p (gas)	8,55 kal/derajat mol

(Patnaik, 2002)

II.8.3 Diagram Fasa Larutan NaCl/H₂O

Natrium Klorida memiliki diagram fasa seperti pada Gambar 2.8 berikut :

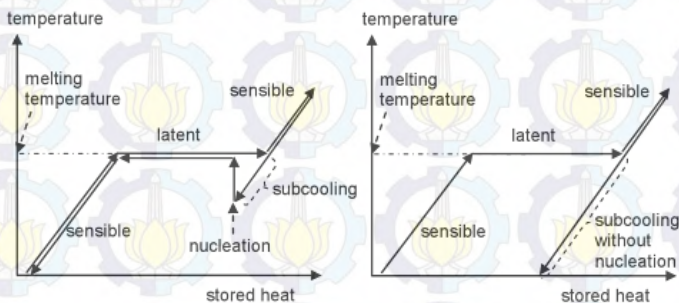


Gambar 2.8. Diagram fasa untuk larutan NaCl/H₂O
(Couper dkk, 2012)



II.4 Fenomena *Supercooling*

Beberapa PCM tidak mengalami solidifikasi secara langsung ketika pendinginan mencapai titik di bawah temperatur leburnya, tetapi kristalisasi hanya terjadi setelah temperatur di bawah titik meltingnya tercapai. Efek ini dinamakan *subcooling* atau *supercooling*. Sebagai contoh, cairan air bisa didinginkan hingga temperatur di bawah 0°C , bila sejumlah cairan dalam kondisi murni dan kuantitas yang kecil bahkan bisa mencapai -15°C . Pada Gambar 2.9 di bawah ini, ditunjukkan efek dari *supercooling* pada penyimpanan panas. Selama terjadi pemberian panas, tidak ada perbedaan pada PCM yang menunjukkan terjadinya *supercooling* atau tidak. Selama ekstraksi panas pun panas laten tidak dilepaskan ketika temperatur lebur dicapai berdasar *supercooling*. Efek dari *supercooling* ini membuatnya perlu untuk menurunkan temperatur dibawah temperatur perubahan fasanya untuk memulai kristalisasi dan untuk melepaskan panas laten yang disimpan pada material. Bila nukleasi tidak terjadi pada keseluruhan, panas laten tidak akan dilepaskan secara keseluruhan pula, dan material hanya menyimpan *sensible heat*. Dalam aplikasi teknis PCM, peristiwa ini bisa menjadi masalah serius (Mehling dkk, 2008).



Gambar 2.9. Pengaruh *supercooling* pada Penyimpanan Panas.

Kiri: dengan sedikit *supercooling* dan nukleasi. Kanan: *supercooling* berlebihan tanpa terjadi nukleasi.



Penanganan dari masalah ini adalah dengan mengurangi temperaturnya hingga di bawah temperatur perubahan fasa. Penanganan ini dilakukan agar material PCM dapat memulai kristalisasi dan untuk melepaskan panas laten yang disimpan oleh material tersebut. Tetapi bila nukleasi tidak terjadi, panas laten tidak bisa dilepaskan dan material hanya menyimpan *sensible heat*. Masalah *supercooling* bisa dicegah dengan cara berikut: 1) menambahkan agen nukleasi, 2) pengadukan mekanis, 3) penambahan metode pemurnian, 4) teknik *cold finger*, 5) memberikan enkapsulasi pada PCM (Gao dkk, 2013).

II.9 Penelitian Sebelumnya

Tabel 2.5 Penelitian Sebelumnya

No	Peneliti	Variasi		Hasil
1	Ming Liu et al (2006)	Bahan PCM Aditif	PCM-34 A,B,C	- Titik Beku dan leleh antara -34°C dan -35°C - Bahan additive mengurangi <i>supercooling</i> hingga 5,8-7°C
2	Lu, W dan Tassou, S.A (2013)	Bahan PCM Aditif	- Parafin - Water based PCM - Glycol AgI	- Pembekuan Sampel air mulai 1,5°C dan 2,5°C untuk water/glycol specimen. - Untuk aplikasi penggunaan PCM pada 0°C, gel air dengan AgI (lebih dari 1,6%) harus <i>dicharged</i> di bawah -1,4



- Untuk aplikasi penggunaan PCM di bawah 0°C , gel air/anti beku dengan AgI (2,5 %) menunjukkan performa terbaik
- Parafin tidak cocok digunakan karena panas laten yang rendah, konduktivitas rendah dan tinggi biaya.



BAB III METODOLOGI

III.1 Alat

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mesin *Freezer* (Merk Modena MD10W)
Digunakan sebagai chamber untuk mengetahui kurva pendinginan dari larutan eutektik. Spesifikasi alat yaitu kapasitas 100 liter dan temperatur pembekuan maksimal hingga -25°C .

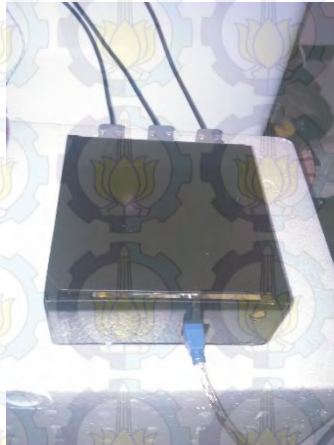


Gambar 3.1 *Freezer*

2. Alat Pengujian *Temperature Data Logger*
Alat ini digunakan untuk mengetahui kurva pendinginan larutan. Sensor yang digunakan adalah DS18B20 sejumlah tiga unit dengan jangkauan temperatur -55°C hingga 125°C . Sensor ini telah dikalibrasi dengan thermometer standar APPA 55 untuk penggunaan di temperatur minus. Berikut adalah koefisien determinasi (R^2) masing-masing sensor berdasar hasil kalibrasi.

**Tabel 3.1** Data Hasil Kalibrasi

Sensor ke-	Rentang Temperatur	R ²
1	25,1 – 0 °C	0,9989
	0 – -24,7 °C	0,9995
2	25,1 – 0 °C	0,9984
	0 – -24,7 °C	0,9995
3	25,1 – 0 °C	0,9984
	0 – -24,7 °C	0,9982



(a)



(b)

Gambar 3.2 (a) *Temperatur Data Logger*
 (b) *Thermometer APPA 55*

3. Neraca Digital

Alat ini digunakan untuk menimbang massa garam dan massa larutan yang dibuat. Alat ini memiliki kemampuan pengukuran hingga 2000 gram dengan ketelitian dua digit di belakang koma.

**Gambar 3.3** Neraca Digital

4. Tabung Logam
Alat ini digunakan sebagai wadah larutan ketika dilakukan proses pengujian dengan temperatur data logger.

**Gambar 3.4** Tabung Logam

III.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Serbuk NaCl merk *SAP Chemicals*

Tabel 3.2 Spesifikasi NaCl

Kandungan	Prosentase
<i>Assay</i>	> 99,5 %
<i>Heavy Metals</i>	< 0,0005 %
<i>Iron</i>	< 0,001 %
<i>Hexacyanoferrate</i>	< 0,002 %



2. Serbuk MgCl_2 merk *SAP Chemicals*

Tabel 3.3 Spesifikasi MgCl_2

Kandungan	Prosentase
<i>Assay</i>	> 98 %

3. Serbuk NH_4Cl merk *SAP Chemicals*

Tabel 3.4 Spesifikasi NH_4Cl

Kandungan	Prosentase
<i>Assay</i>	> 99,5 %
<i>Sulfate</i>	< 0,015 %
<i>Iron</i>	< 0,002 %
<i>Copper</i>	< 0,0025 %

4. Serbuk Boraks (Natrium Tetraborate Decahidrat) merk *SAP Chemicals*

Tabel 3.5 Spesifikasi Boraks

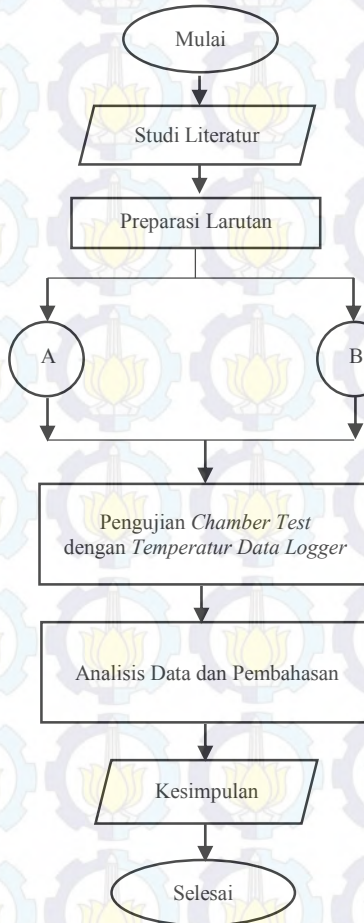
Kandungan	Prosentase
<i>Assay</i>	> 99 %
pH 5% <i>water</i>	9,2 – 9,5
<i>Sulfate</i>	< 0,005 %
<i>Heavy metals</i>	< 0,002 %

5. Aqua demineral (Aqua DM) sebagai pelarut H_2O

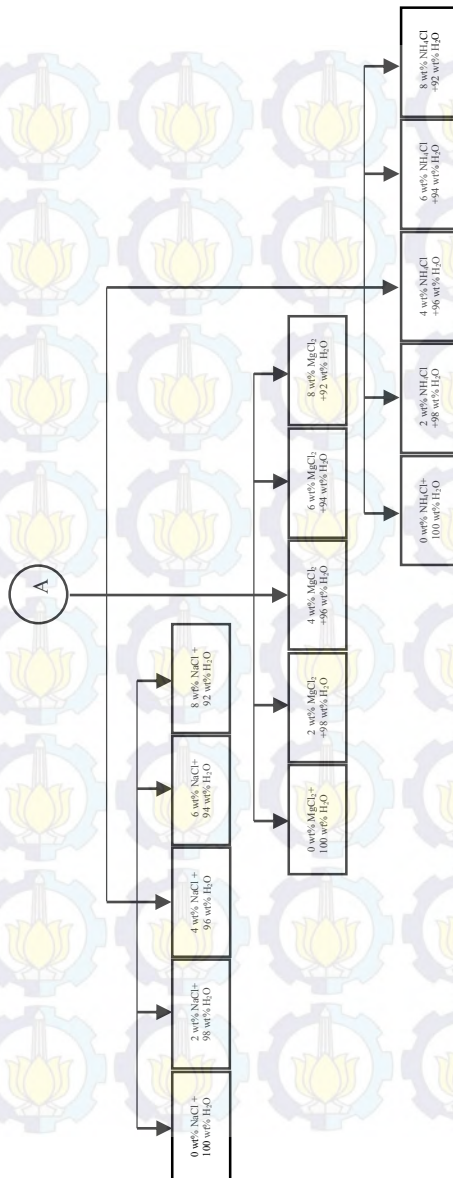


III.3 Diagram Alir Penelitian

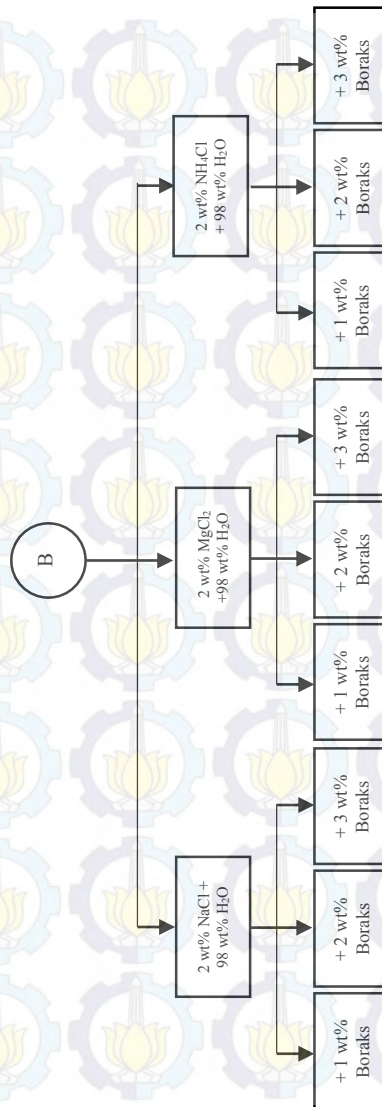
Pada penelitian ini digunakan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 hingga Gambar 3.7.



Gambar 3.5 Diagram Alir penelitian (Keseluruhan)



Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian (A)



Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian (B)



III.4 Metode Penelitian

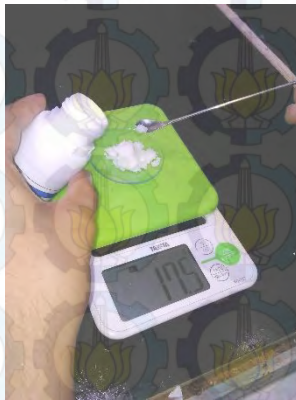
Metode penelitian adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur
Proses yang dilakukan adalah studi terkait *Phase Change Material*, derajat *Supercooling* hingga *Cold Storage*, baik dari buku maupun jurnal yang mempelajari terkait hal-hal tersebut.
2. Eksperimental
Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian *Chamber Test* dengan menggunakan *freezer* dan *temperature data logger*.

III.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian adalah sebagai berikut :

1. Melakukan preparasi larutan
 - 1) Menimbang serbuk garam NaCl dengan neraca digital sejumlah 2 gram untuk komposisi 2 wt%, 4 gram untuk 4 wt%, 6 gram untuk 6 wt% dan 8 gram untuk 8 wt%.



Gambar 3.8 Proses Penimbangan Serbuk Garam

- 2) Memasukkan masing-masing serbuk garam ke dalam labu ukur 500 mL.



Gambar 3.9 Proses Memasukkan Serbuk Garam

- 3) Memasukkan H_2O hingga massa larutan 100 gram pada masing-masing jenis larutan.



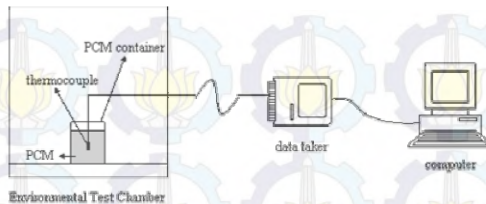
Gambar 3.10 Proses Memasukkan Larutan H_2O

- 4) Melakukan *stirring* pada labu ukur hingga pencampuran merata.

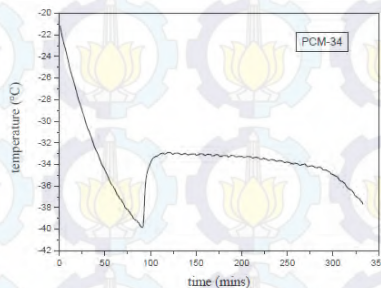


Gambar 3.11 Proses *Stirring* Larutan

- 5) Mengulangi langkah 1-4 untuk semua garam MgCl_2 dan NH_4Cl .
2. Melakukan penambahan agen nukleasi yaitu boraks dengan variasi persen massa 1%, 2% dan 3% pada larutan 2 wt% garam klorida + 98 wt% H_2O untuk setiap jenis garam klorida. Proses pencampuran dilakukan dengan *magnetic stirrer*.
3. Melakukan pengujian *Chamber Test* untuk mengetahui kurva pendinginan dari larutan sehingga derajat *supercooling* larutan dengan variasi komposisi dan setelah penambahan agen nukleasi dapat diketahui. Pengujian ini mengacu pada penelitian Ming Liu *et al* (2006) dengan rancangan eksperimental seperti gambar 3.12 berikut. Pengujian yang dilakukan oleh peneliti tersebut memberikan data kurva pendinginan (temperature vs waktu) seperti pada gambar 3.13 berikut. Rancangan ini juga merupakan bentuk sederhana dari *Temperature-History (T-History) Method* oleh Yinping *et al* (1999) dan Marin *et al* (2003).



Gambar 3.12 Rancangan Eksperimen oleh Ming Liu *et al* (2006)



Gambar 3.13 Data Hasil Eksperimen oleh Ming Liu *et al* (2006)

Pada penelitian ini, rancangan eksperimen tersebut diadaptasi dengan penyesuaian pada beberapa hal seperti pada Gambar 3.14 hingga 3.16. *Chamber* yang digunakan adalah *Freezer* dengan kapasitas 100 liter dan temperatur chamber saat pengujian $-25 \pm 3^{\circ}\text{C}$. *Temperature data logger* menggunakan jenis sensor DS18B20 dengan jangkauan temperatur -55°C hingga 125°C . Sensor ini telah dikalibrasi dengan thermometer standar APPA 55 untuk penggunaan di temperatur $25,1^{\circ}\text{C}$ hingga $-24,7^{\circ}\text{C}$. Adapun langkah pengujiannya sebagai berikut :

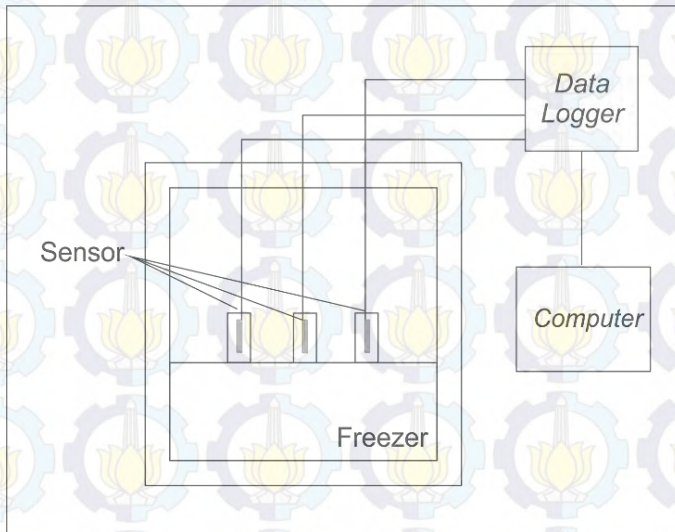
- 1) Menyiapkan 15 mL larutan yang akan diuji.
- 2) Memasukkan larutan tersebut ke dalam tabung logam.
- 3) Memasukkan tabung logam ke dalam chamber disertai memasukkan sensor temperatur tepat di tengah *wadah*.



- 4) Memulai pembacaan pada *temperatur data logger* hingga pembacaan temperatur mencapai temperatur *chamber* $-25 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- 5) Proses pengujian dilakukan tiga kali.
- 6) Derajat *supercooling* (ΔT) didefinisikan sebagai berikut :

$$\Delta T = T_f - T_c > 0$$

ΔT dituliskan sebagai perbedaan antara temperatur beku larutan (T_f) dan temperatur dimana kristalisasi atau nukleasi menjadi solid dimulai (T_c).



Gambar 3.14 Skema Eksperimen



Gambar 3.15 Posisi Peletakan Tabung Logam



Gambar 3.16 Proses Pengujian



III.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.6 Rancangan Penelitian

Jenis Garam Klorida	Variabel		<i>Chamber Test</i>
	Komposisi Garam Klorida	Penambahan Agen Nukleasi	
NaCl	0 wt% NaCl + 100 wt% H ₂ O	-	✓
	2 wt% NaCl + 98 wt% H ₂ O	✓	✓
	4 wt% NaCl + 96 wt% H ₂ O	-	✓
	6 wt% NaCl + 94 wt% H ₂ O	-	✓
	8 wt% NaCl + 92 wt% H ₂ O	-	✓
MgCl ₂	0 wt% MgCl ₂ + 100 wt% H ₂ O	-	✓
	2 wt% MgCl ₂ + 98 wt% H ₂ O	✓	✓
	4 wt% MgCl ₂ + 96 wt% H ₂ O	-	✓
	6 wt% MgCl ₂ + 94 wt% H ₂ O	-	✓
	8 wt% MgCl ₂ + 92 wt% H ₂ O	-	✓



NH ₄ Cl	0 wt% NH ₄ Cl + 100 wt% H ₂ O	-	✓
	2 wt% NH ₄ Cl + 98 wt% H ₂ O	✓	✓
	4 wt% NH ₄ Cl + 96 wt% H ₂ O	-	✓
	6 wt% NH ₄ Cl + 94 wt% H ₂ O	-	✓
	8 wt% NH ₄ Cl + 92 wt% H ₂ O	-	✓



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB IV

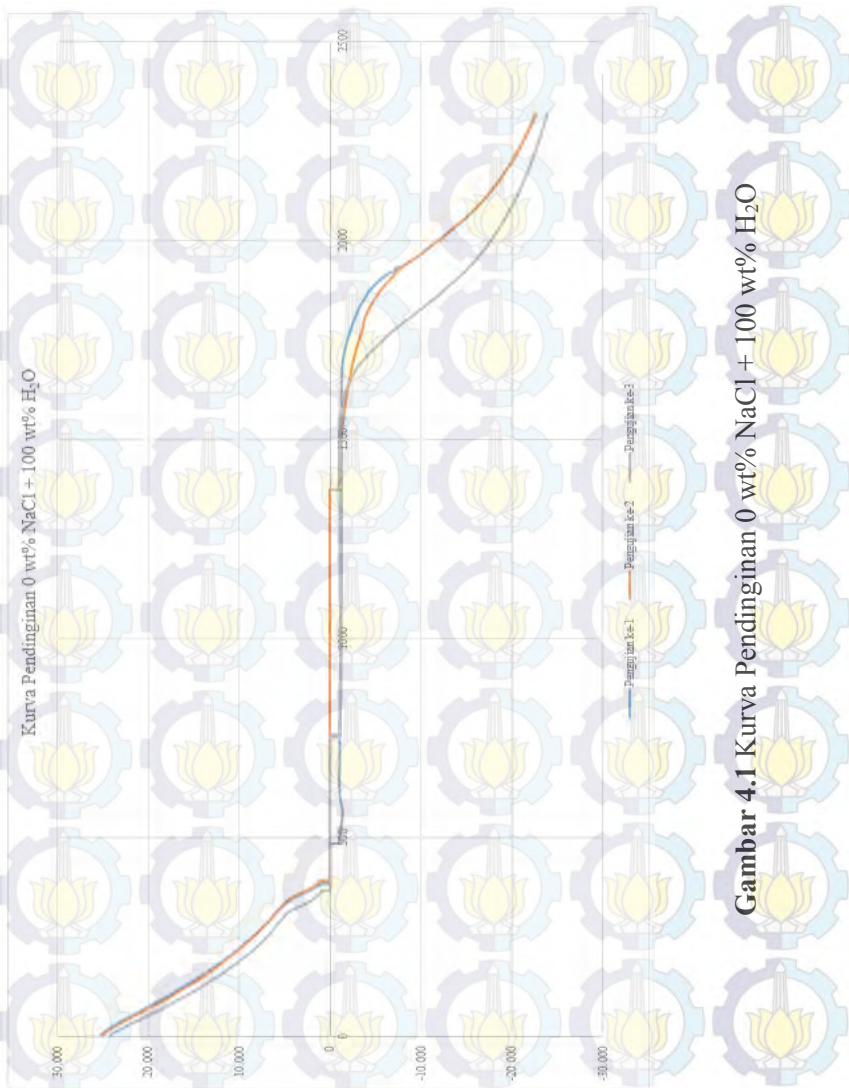
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

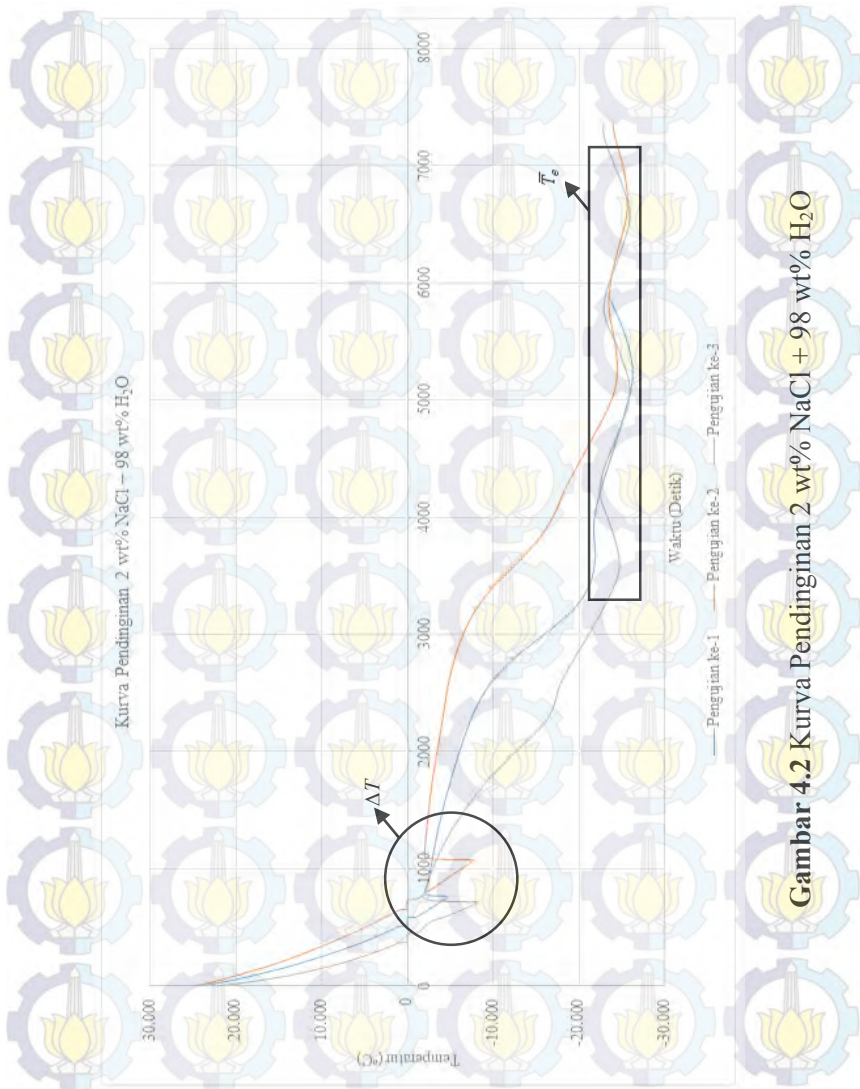
IV.1 Analisis Hasil *Chamber Test* Larutan Eutektik Garam Klorida/H₂O dengan Variasi Komposisi Garam Klorida

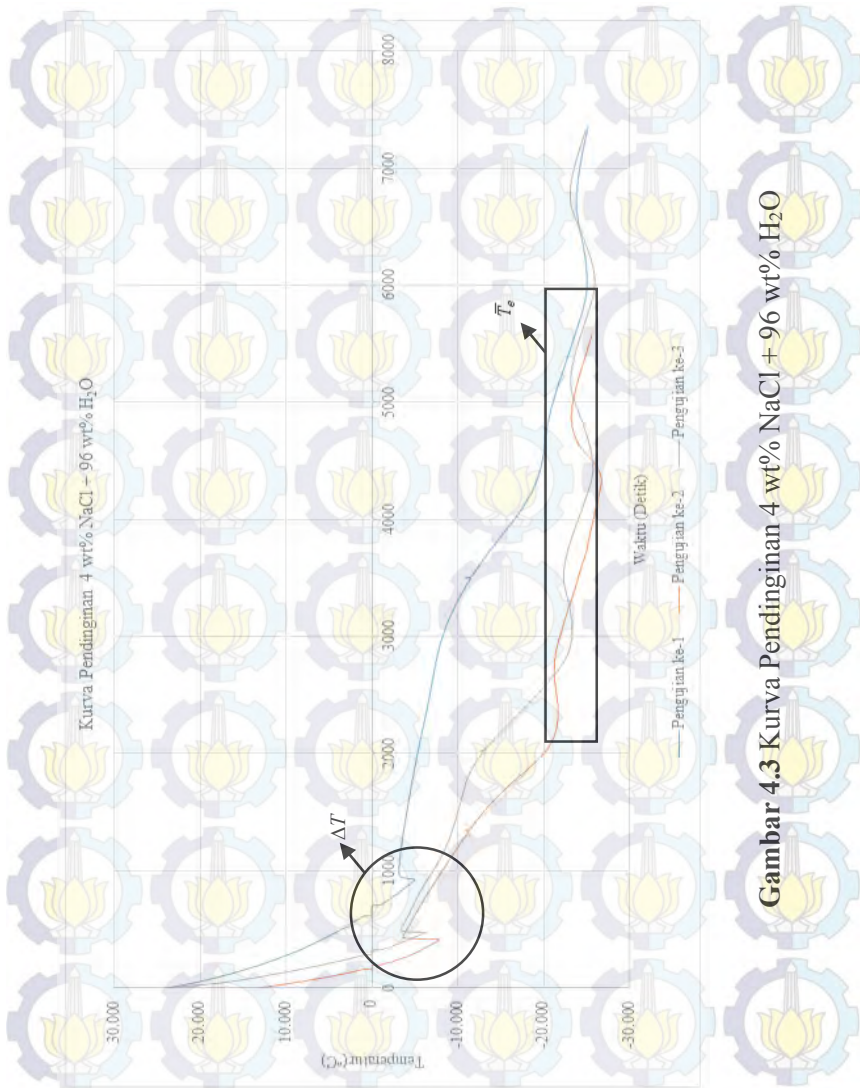
Pengujian *Chamber Test* pada beberapa variasi komposisi garam klorida dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap derajat *supercooling* berdasarkan kurva pendinginannya.

a. Analisis Larutan NaCl/H₂O

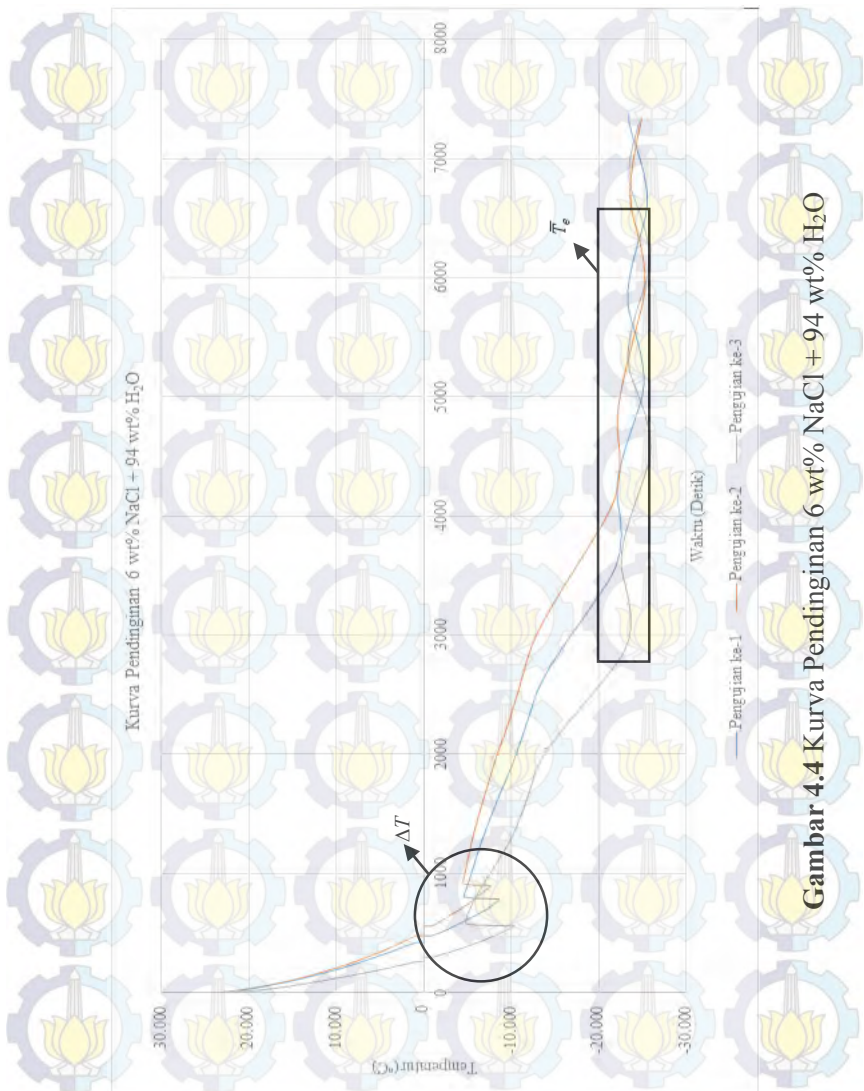
Kurva pendinginan larutan NaCl/H₂O dengan variasi komposisi 0 wt% NaCl, 2 wt% NaCl, 4 wt% NaCl, 6 wt% NaCl dan 8 wt% NaCl ditampilkan dalam Gambar 4.1 hingga 4.5. Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.1 untuk dibandingkan.

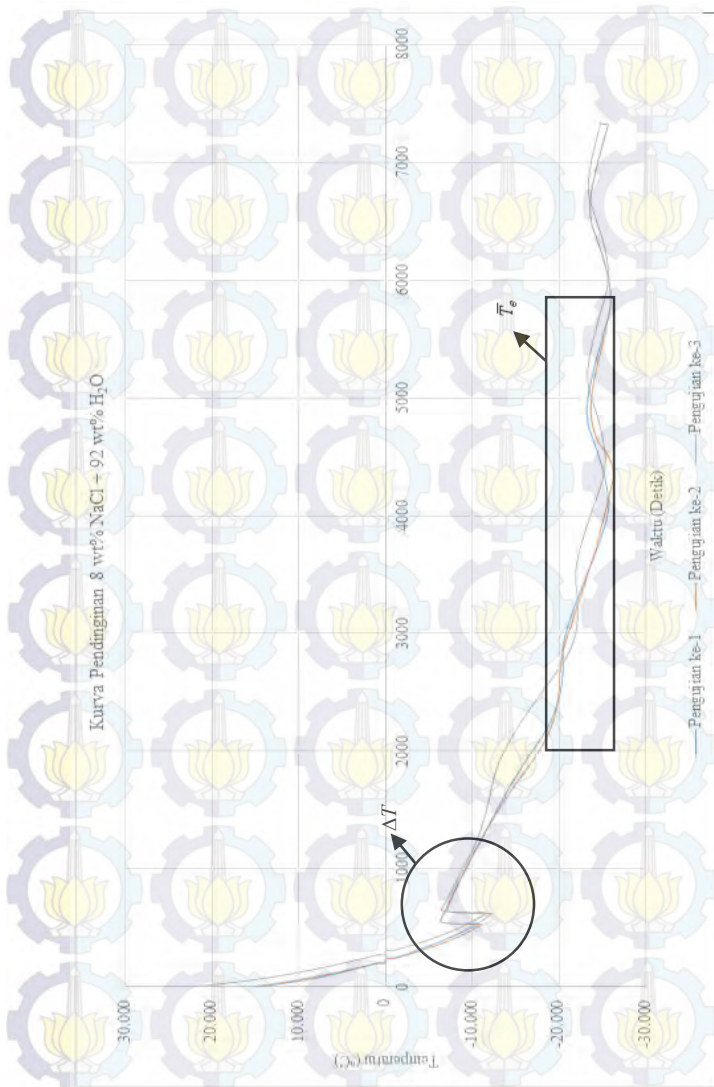






Gambar 4.3 Kurva Pendinginan 4 wt% NaCl + 96 wt% H₂O





Gambar 4.5 Kurva Pendinginan 8 wt% NaCl + 92 wt% H₂O

**Tabel 4.1** Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NaCl/H₂O dengan Variasi Komposisi

Komposisi NaCl	Uji ke-	T_f (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	\bar{T}_e (°C)
0 wt% NaCl	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	\bar{x}	0	0	0	0
	Δx	0	0	0	0
2 wt% NaCl	1	-3,75	-4,75	1,00	-21,88
	2	-2,00	-7,69	5,69	-24,44
	3	-2,00	-8,25	6,25	-24,63
	\bar{x}	-2,58	-6,90	4,31	-23,65
	Δx	1,01	1,88	2,88	1,54
4 wt% NaCl	1	-3,13	-4,94	1,81	-20,19
	2	-3,63	-7,88	4,25	-21,63
	3	-3,75	-6,13	2,38	-23,31
	\bar{x}	-3,50	-6,31	2,81	-21,71
	Δx	0,33	1,48	1,28	1,56
6 wt% NaCl	1	-4,63	-8,63	4,00	-22,50
	2	-4,69	-7,56	2,88	-22,38
	3	-4,94	-10,31	5,38	-23,63
	\bar{x}	-4,75	-8,83	4,08	-22,83
	Δx	0,17	1,39	1,25	0,69
8 wt% NaCl	1	-7,56	-12,13	4,56	-20,44
	2	-6,50	-11,00	4,50	-20,00
	3	-6,50	-11,56	5,06	-22,19
	\bar{x}	-6,85	-11,56	4,71	-20,88
	Δx	0,61	0,56	0,31	1,16

Berdasarkan Tabel 4.1 tersebut dapat diketahui nilai temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa komposisi larutan. Larutan dengan komposisi 0 wt% NaCl atau 100 wt% air murni memiliki temperatur beku 0°C dan tidak memiliki temperatur eutektik. Larutan ini tidak memiliki derajat *supercooling* karena temperatur kristalisasinya sama dengan temperatur beku. Larutan dengan komposisi 2 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-2,58 \pm 1,01)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-23,65 \pm 1,54)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,31 \pm 2,88)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 4 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-3,5 \pm 0,33)^\circ\text{C}$

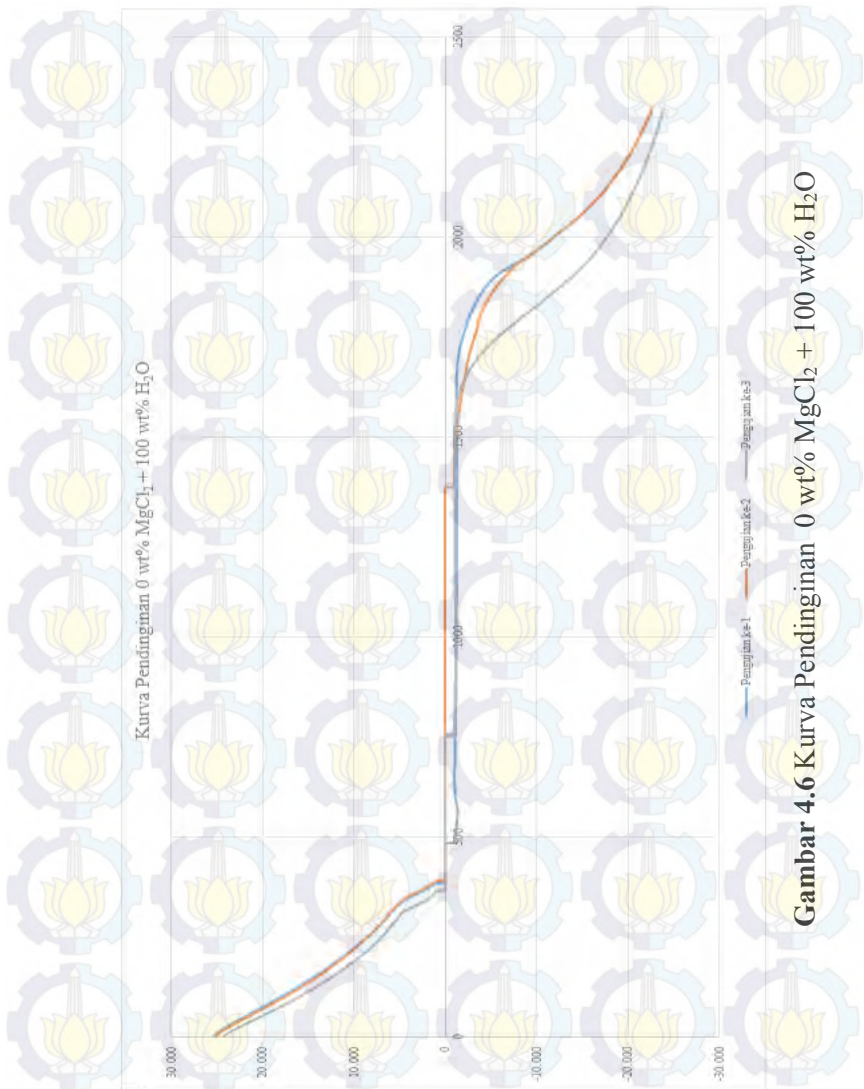


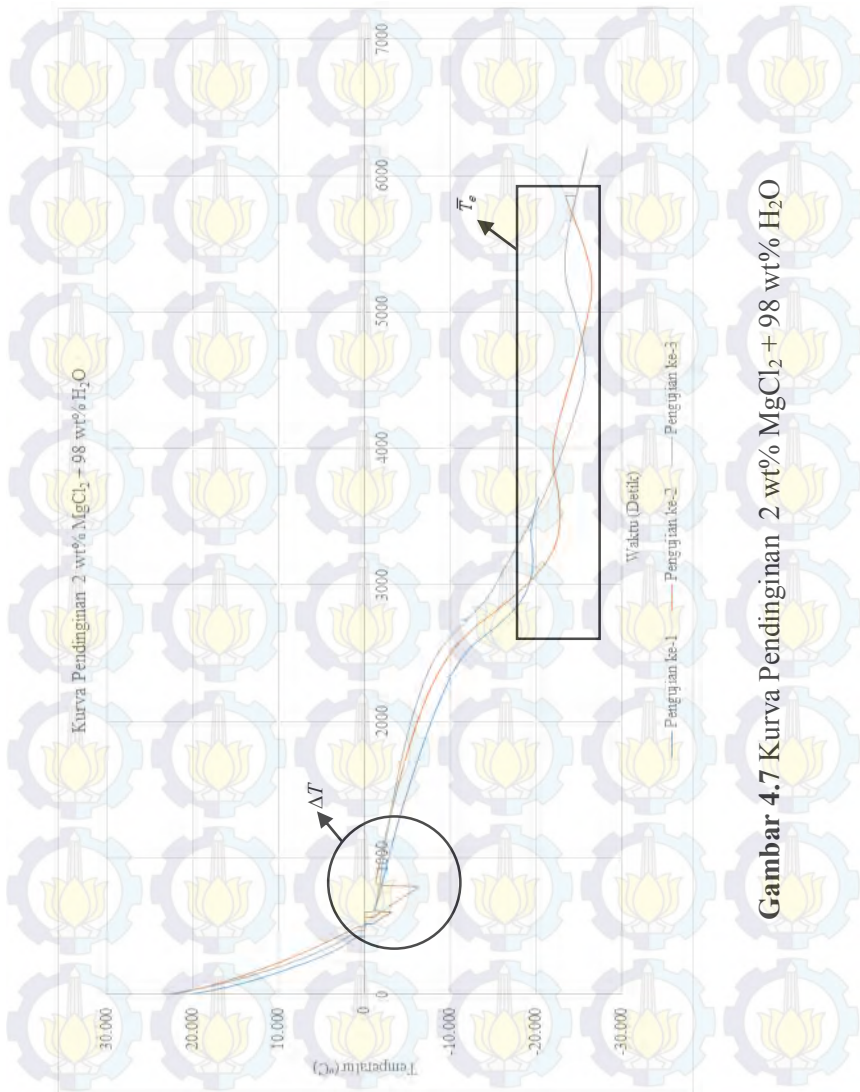
dan rata-rata temperatur eutektik $(-21,71 \pm 1,56)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(2,81 \pm 1,28)^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 6 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-4,75 \pm 0,17)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-22,83 \pm 0,69)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,08 \pm 1,25)^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 8 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-6,85 \pm 0,61)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-20,88 \pm 1,16)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,71 \pm 0,31)^{\circ}\text{C}$.

Hasil tersebut menjelaskan bahwa sifat koligatif pada larutan air berperan dalam perubahan temperatur beku dari semua komposisi larutan. Hal ini terlihat dari semakin turunnya temperatur beku ketika komposisi NaCl ditambah. Selain itu dapat dijelaskan pula bahwa temperatur eutektik dari larutan ini berada di kisaran -19°C hingga -24°C yang menandakan bahwa untuk mencapai hasil pembekuan maksimal ketika larutan ini digunakan sebagai PCM harus dibekukan hingga di bawah temperatur -24°C . Namun dari segi derajat *supercooling*, komposisi NaCl tidak memberikan pengaruh yang linier karena nilai derajat *supercooling* tercatat berfluktuatif mulai dari $(4,31 \pm 2,88)^{\circ}\text{C}$ pada 2 wt% NaCl kemudian turun menjadi $(2,81 \pm 1,28)^{\circ}\text{C}$ pada 4% NaCl. Selanjutnya derajat *supercooling* justru naik menjadi $(4,08 \pm 1,25)^{\circ}\text{C}$ pada 6 wt% NaCl dan terus naik hingga $(4,71 \pm 0,31)^{\circ}\text{C}$ pada 8 wt% NaCl.

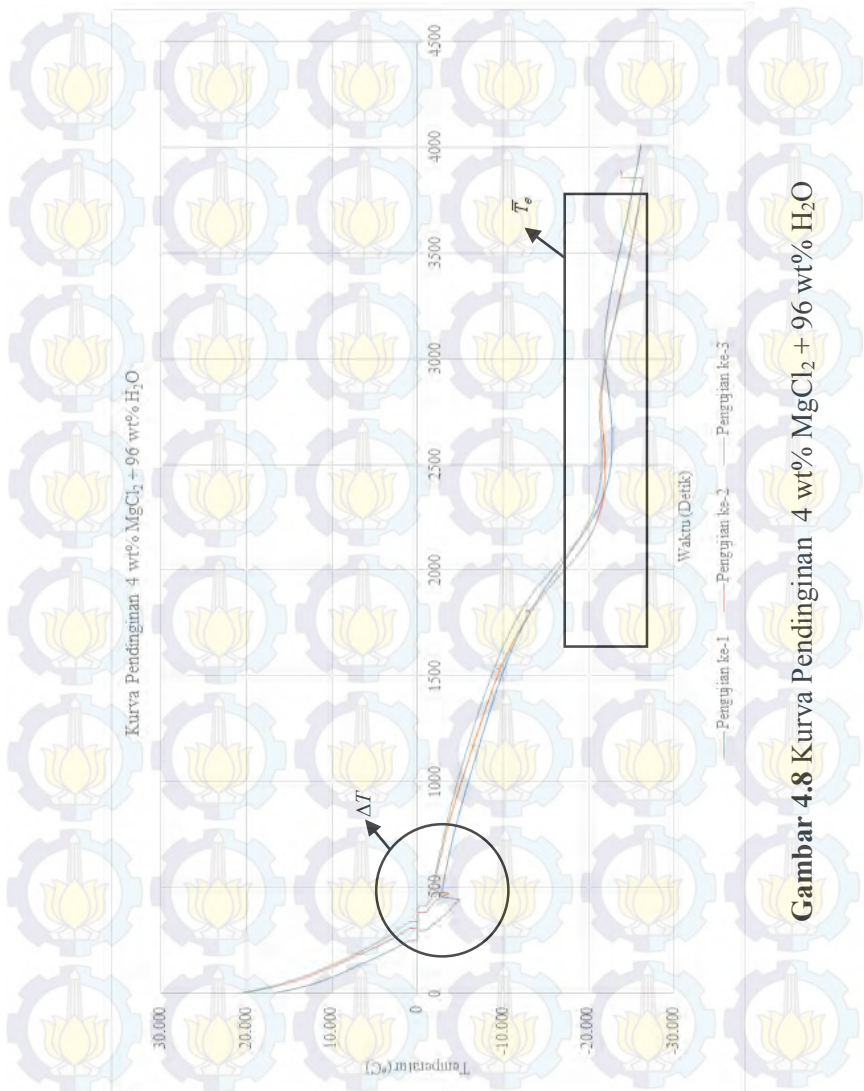
b. Analisis Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$

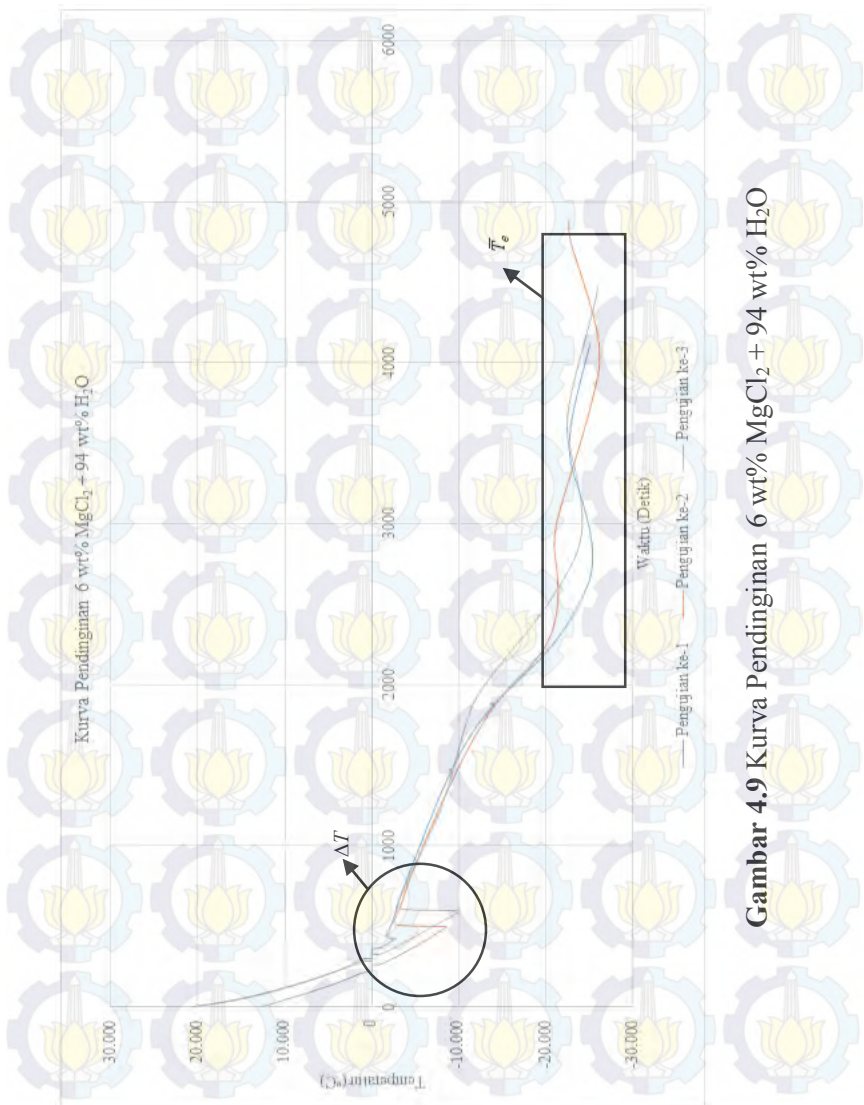
Kurva pendinginan larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dengan variasi komposisi 0 wt% MgCl_2 , 2 wt% MgCl_2 , 4 wt% MgCl_2 , 6 wt% MgCl_2 dan 8 wt% MgCl_2 ditampilkan dalam Gambar 4.6 hingga 4.10. Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.2 untuk dibandingkan.



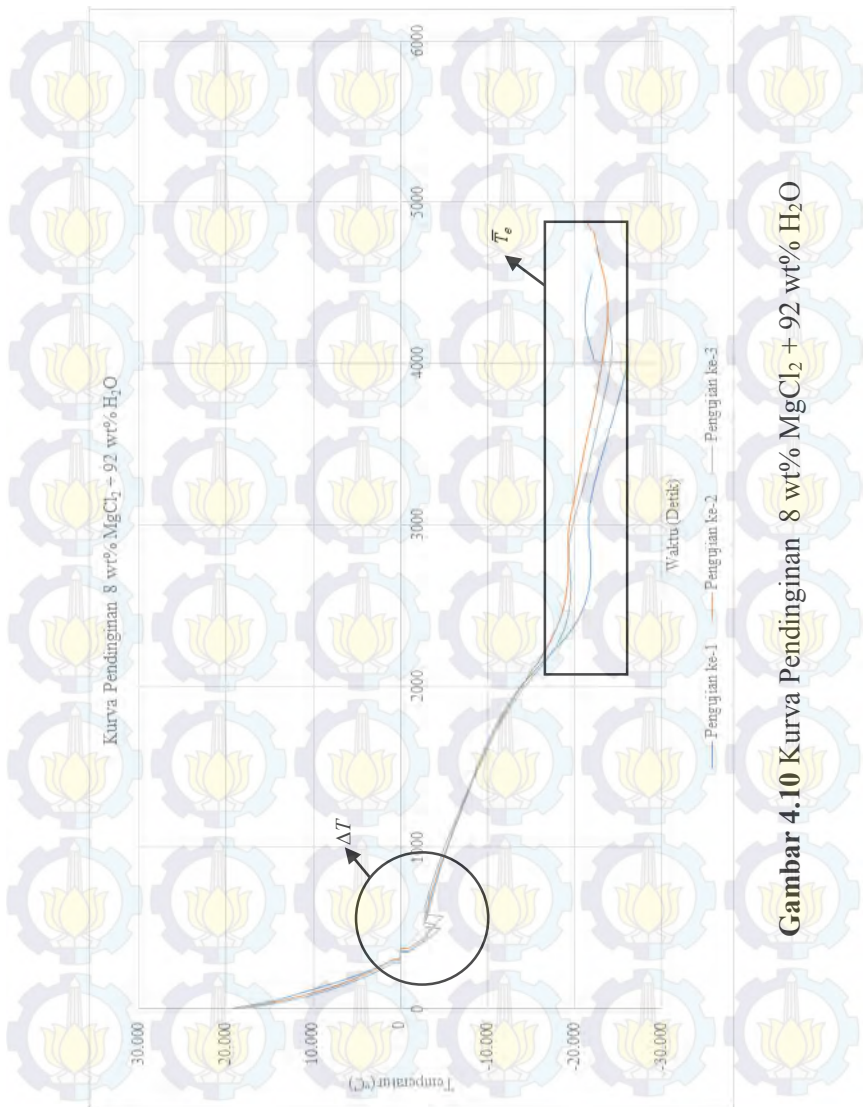


Gambar 4.7 Kurva Pendinginan 2 wt% MgCl_2 + 98 wt% H_2O





Gambar 4.9 Kurva Pendinginan 6 wt% MgCl_2 + 94 wt% H_2O



Gambar 4.10 Kurva Pendinginan 8 wt% MgCl_2 + 92 wt% H_2O



Tabel 4.2 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dengan Variasi Komposisi

Komposisi NaCl	Uji ke-	T_f (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	\bar{T}_e (°C)
0 wt% MgCl_2	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	\bar{x}	0	0	0	0
	Δx	0	0	0	0
2 wt% MgCl_2	1	-1,19	-3,13	1,94	-19,63
	2	-1,44	-6,19	4,75	-22,75
	3	-1,31	-4,69	3,38	-25,63
	\bar{x}	-1,31	-4,67	3,35	-22,67
	Δx	0,13	1,53	1,41	3,00
4 wt% MgCl_2	1	-2,88	-4,88	2,00	-22,75
	2	-1,94	-3,56	1,63	-21,94
	3	-1,75	-2,25	0,50	-21,56
	\bar{x}	-2,19	-3,56	1,38	-22,08
	Δx	0,61	1,32	0,78	0,61
6 wt% MgCl_2	1	-1,94	-2,63	0,69	-25,38
	2	-2,81	-8,56	5,75	-21,44
	3	-3,06	-10,00	6,94	-24,19
	\bar{x}	-2,60	-7,06	4,46	-23,67
	Δx	0,59	3,91	3,32	2,02
8 wt% MgCl_2	1	-2,94	-4,50	1,56	-21,81
	2	-2,88	-4,06	1,19	-19,25
	3	-2,81	-4,94	2,13	-19,56
	\bar{x}	-2,88	-4,50	1,63	-20,21
	Δx	0,07	0,44	0,47	1,40

Berdasarkan Tabel 4.2 tersebut dapat diketahui temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa komposisi larutan. Larutan dengan komposisi 0 wt% MgCl_2 atau 100 wt% air murni memiliki temperatur beku 0°. Larutan ini juga tidak memiliki derajat *supercooling* karena temperatur kristalisasinya sama dengan temperatur beku. Larutan dengan komposisi 2 wt% MgCl_2 memiliki temperatur beku $(-1,31 \pm 0,13)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-22,67 \pm 3)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(3,36 \pm 1,41)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 4 wt% MgCl_2 memiliki temperatur beku $(-2,19 \pm 0,61)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-22,08 \pm 0,61)^\circ\text{C}$. Derajat



supercooling tercatat pada $(1,38 \pm 0,78)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 6 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-2,60 \pm 0,59)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-23,67 \pm 2,02)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,46 \pm 3,32)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 8 wt% NaCl memiliki temperatur beku $(-2,88 \pm 0,07)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-20,21 \pm 1,40)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(1,67 \pm 0,47)^\circ\text{C}$.

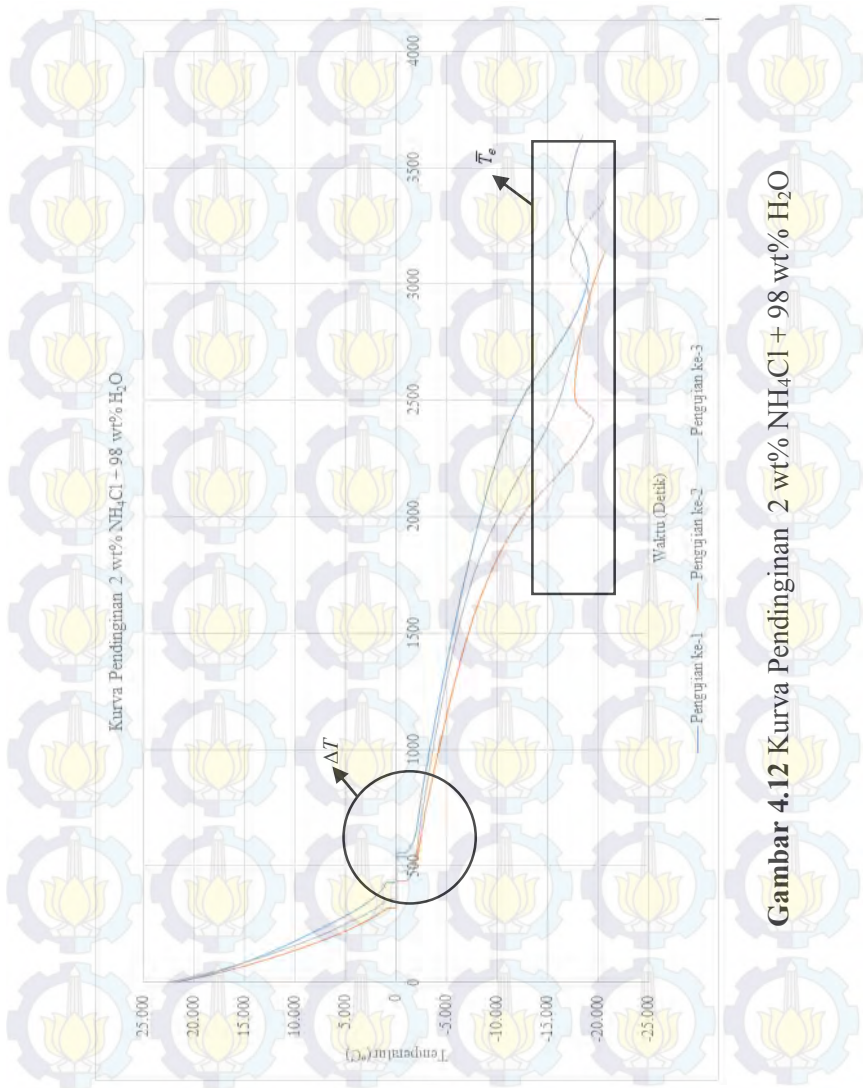
Seperti pada larutan NaCl/H₂O temperatur beku juga turun ketika komposisi MgCl₂ bertambah akibat sifat koligatif air. Selain itu dapat dijelaskan pula bahwa temperatur eutektik dari larutan ini berada di kisaran -19°C hingga -24°C yang menandakan bahwa untuk mencapai hasil pembekuan maksimal ketika larutan ini digunakan sebagai PCM harus dibekukan hingga di bawah temperatur -24°C . Dari segi derajat *supercooling*, komposisi MgCl₂ juga tidak memberikan pengaruh yang linier. Nilai derajat *supercooling* tercatat berfluktuatif mulai dari $(3,36 \pm 1,41)^\circ\text{C}$ pada 2 wt% MgCl₂ kemudian turun menjadi $(1,38 \pm 0,78)^\circ\text{C}$ pada 4% MgCl₂. Selanjutnya derajat *supercooling* justru naik menjadi $(4,46 \pm 3,32)^\circ\text{C}$ pada 6 wt% MgCl₂ dan kembali turun hingga $(1,63 \pm 0,47)^\circ\text{C}$ pada 8 wt% MgCl₂.

c. Analisis Larutan NH₄Cl/H₂O

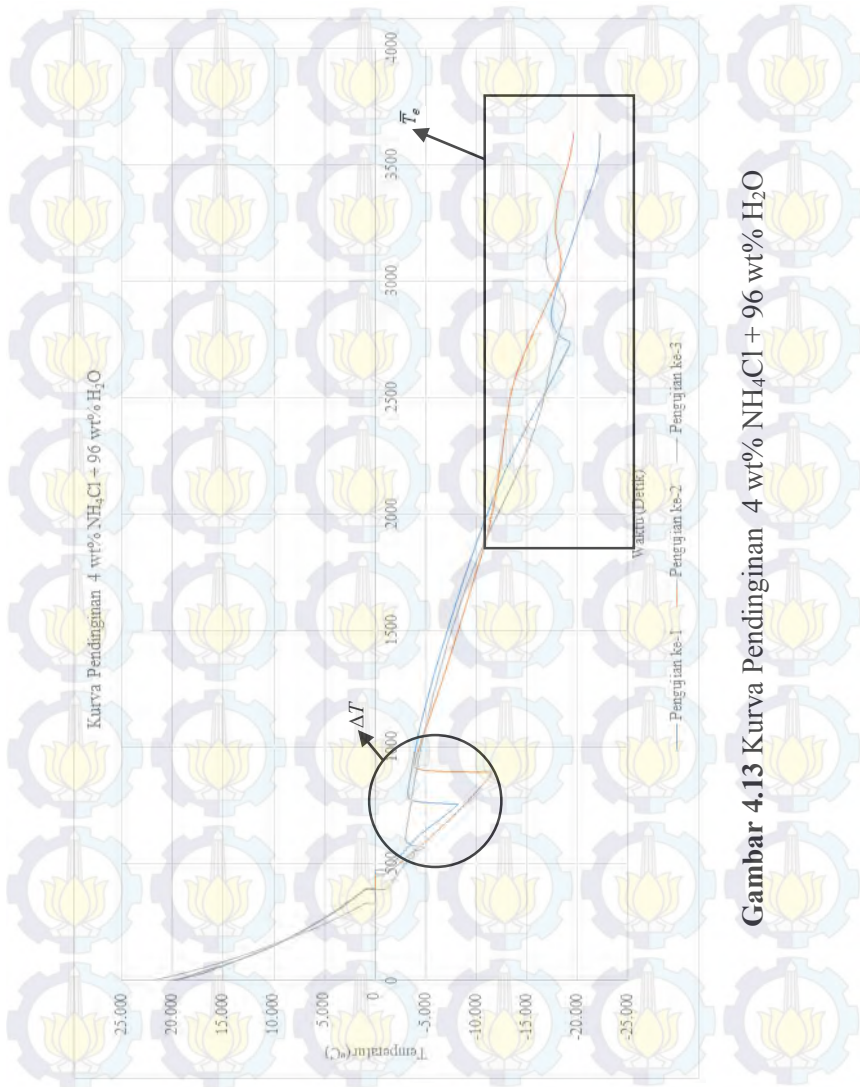
Kurva pendinginan larutan NH₄Cl/H₂O dengan variasi komposisi 0 wt% NH₄Cl, 2 wt% NH₄Cl, 4 wt% NH₄Cl, 6 wt% NH₄Cl dan 8 wt% NH₄Cl ditampilkan dalam Gambar 4.11 hingga 4.15. Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.3 untuk dibandingkan.



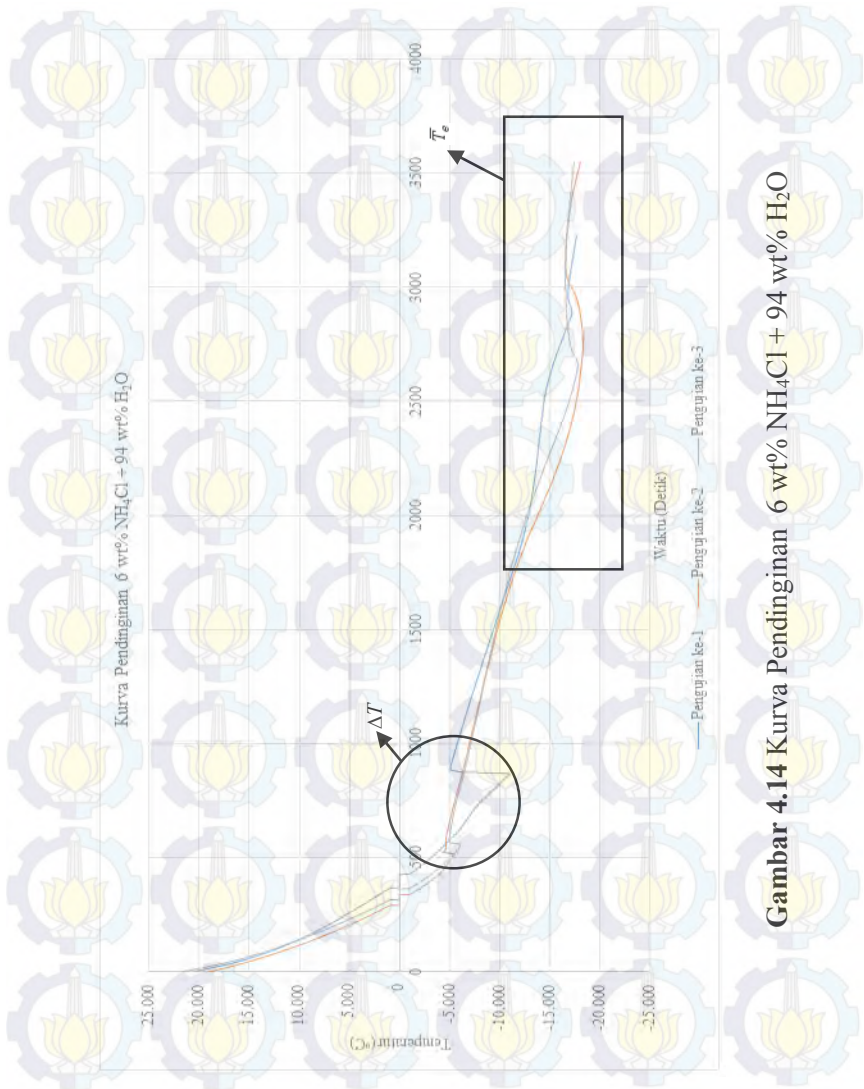
Gambar 4.11 Kurva Pendinginan 0 wt% NH_4Cl + 100 wt% H_2O



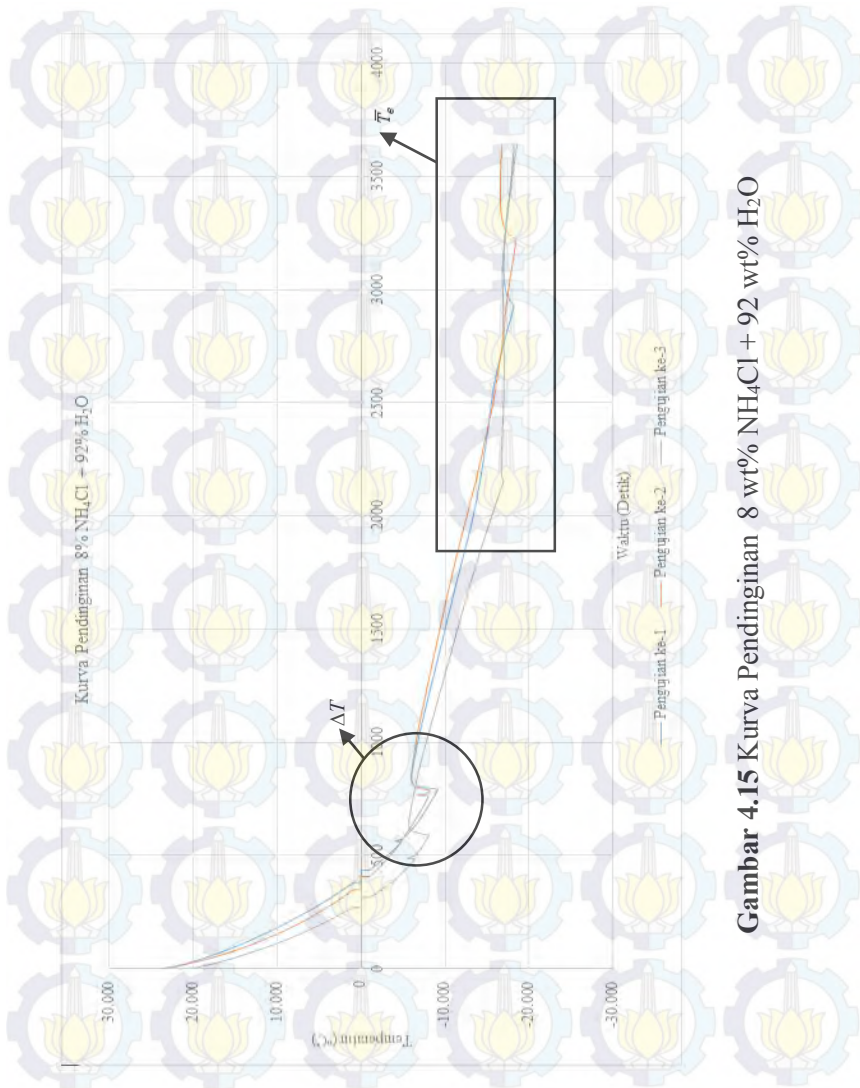
Gambar 4.12 Kurva Pendinginan 2 wt% NH_4Cl + 98 wt% H_2O



Gambar 4.13 Kurva Pendinginan 4 wt% NH_4Cl + 96 wt% H_2O



Gambar 4.14 Kurva Pendinginan 6 wt% NH_4Cl + 94 wt% H_2O



Gambar 4.15 Kurva Pendinginan 8 wt% NH_4Cl + 92 wt% H_2O

**Tabel 4.3** Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ dengan Variasi Komposisi

Komposisi NH_4Cl	Uji ke-	T_f (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	\bar{T}_e (°C)
0 wt% NH_4Cl	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	\bar{x}	0	0	0	0
	Δx	0	0	0	0
2 wt% NH_4Cl	1	-2,00	-2,00	0,00	-16,88
	2	-2,75	-2,75	0,00	-17,63
	3	-2,31	-2,31	0,00	-17,25
	\bar{x}	-2,35	-2,35	0,00	-17,25
	Δx	0,38	0,38	0,00	0,38
4 wt% NH_4Cl	1	-3,25	-8,13	4,88	-17,44
	2	-3,88	-11,56	7,69	-18,38
	3	-3,00	-4,88	1,88	-18,81
	\bar{x}	-3,38	-8,19	4,81	-18,21
	Δx	0,45	3,34	2,91	0,70
6 wt% NH_4Cl	1	-5,19	-11,06	5,88	-17,19
	2	-4,63	-5,44	0,81	-18,81
	3	-5,00	-6,06	1,06	-17,81
	\bar{x}	-4,94	-7,52	2,58	-17,94
	Δx	0,28	3,08	2,86	0,82
8 wt% NH_4Cl	1	-6,06	-9,13	3,06	-18,13
	2	-6,00	-8,13	2,13	-18,38
	3	-5,75	-8,06	2,31	-16,88
	\bar{x}	-5,94	-8,44	2,50	-17,79
	Δx	0,16	0,60	0,49	0,80

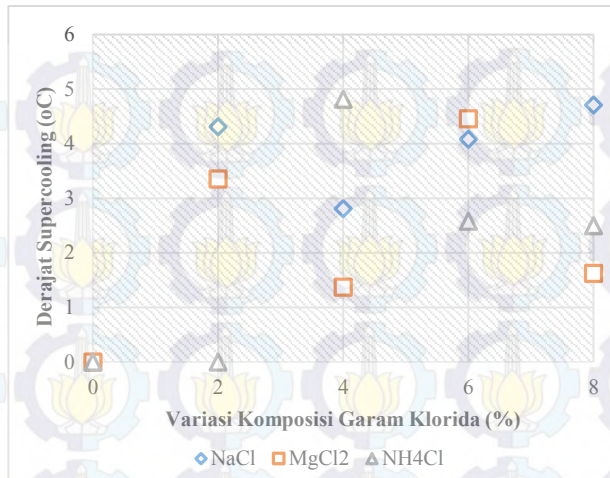
Berdasarkan Tabel 4.3 tersebut dapat diketahui temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa komposisi larutan. Larutan dengan komposisi 0 wt% NH_4Cl atau 100 wt% air murni memiliki temperatur beku 0°C dan tidak memiliki temperatur eutektik. Larutan ini juga tidak memiliki derajat *supercooling* karena temperatur kristalisasinya sama dengan temperatur beku. Larutan dengan komposisi 2 wt% NH_4Cl memiliki temperatur beku $(-2,35 \pm 0,38)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-17,25 \pm 0,38)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada 0°C. Larutan dengan komposisi 4 wt% NH_4Cl memiliki temperatur beku $(-3,38 \pm 0,45)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik (-



18,21 \pm 0,70) $^{\circ}$ C. Derajat *supercooling* tercatat pada (4,82 \pm 2,91) $^{\circ}$ C. Larutan dengan komposisi 6 wt% NH₄Cl memiliki temperatur beku (-4,94 \pm 0,28) $^{\circ}$ C dan rata-rata temperatur eutektik (-17,94 \pm 0,82) $^{\circ}$ C. Derajat *supercooling* tercatat pada (2,58 \pm 2,86) $^{\circ}$ C. Larutan dengan komposisi 8 wt% NH₄Cl memiliki temperatur beku (-5,94 \pm 0,16) $^{\circ}$ C dan rata-rata temperatur eutektik (-17,79 \pm 0,80) $^{\circ}$ C. Derajat *supercooling* tercatat pada (2,5 \pm 0,49) $^{\circ}$ C.

Seperti pada larutan NaCl/H₂O dan MgCl₂/H₂O, temperatur beku larutan ini pun bertambah akibat sifat koligatif air. Selain itu dapat dijelaskan pula bahwa temperatur eutektik dari larutan ini berada di kisaran -17 $^{\circ}$ C hingga -18 $^{\circ}$ C yang menandakan bahwa untuk mencapai hasil pembekuan maksimal ketika larutan ini digunakan sebagai PCM harus dibekukan hingga di bawah temperatur -18 $^{\circ}$ C. Dari segi derajat *supercooling*, komposisi NH₄Cl juga tidak memberikan pengaruh yang linier. Nilai derajat *supercooling* tercatat berfluktuatif mulai dari 0 $^{\circ}$ C pada 2 wt% NH₄Cl kemudian naik menjadi (4,81 \pm 2,91) $^{\circ}$ C pada 4% NH₄Cl. Selanjutnya derajat *supercooling* turun menjadi (2,58 \pm 2,86) $^{\circ}$ C pada 6 wt% NH₄Cl dan kembali turun hingga (2,5 \pm 0,49) $^{\circ}$ C pada 8 wt% NH₄Cl.

Berdasarkan hasil analisis data tersebut maka perubahan rata-rata derajat *supercooling* di setiap variasi komposisi garam klorida dapat ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.16 Derajat *Supercooling* Larutan Garam Klorida/H₂O di Setiap Variasi Komposisi Garam Klorida

Fenomena *Supercooling* terjadi pada hampir semua jenis variasi komposisi garam klorida yang diuji. Derajat *supercooling* yang terjadi menunjukkan trend fluktuatif antara 0-5°C. Pada komposisi 2 wt% garam klorida, rata-rata derajat *supercooling* larutan NaCl/H₂O sebesar 4,31°C, larutan MgCl₂/H₂O sebesar 3,354 dan larutan NH₄Cl/H₂O justru tidak menunjukkan adanya derajat *supercooling*. Pada komposisi 4 wt% garam klorida, baik larutan NaCl/H₂O dan MgCl₂/H₂O menunjukkan penurunan derajat *supercooling* menjadi 2,81°C dan 1,375°C. Namun larutan NH₄Cl/H₂O justru menunjukkan peningkatan hingga 4,81°C. Pada komposisi 6 wt% garam klorida, larutan NaCl/H₂O dan MgCl₂/H₂O menunjukkan peningkatan derajat *supercooling* menjadi 4,08°C dan 4,458°C. Namun larutan NH₄Cl/H₂O justru menunjukkan penurunan hingga 2,58°C. Terakhir pada komposisi 8 wt% garam klorida, larutan NH₄Cl/H₂O dan MgCl₂/H₂O menunjukkan penurunan derajat *supercooling* menjadi 2,5°C dan



1,625°C. Namun larutan NaCl/H₂O justru menunjukkan peningkatan hingga 4,7°C.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi garam klorida tidak memberikan pola pengaruh yang sama terhadap derajat *supercooling*. Padahal bila merujuk pada *JSME Data Book Thermophysical Properties of Fluid* (1983), penambahan konsentrasi garam klorida khususnya NaCl seharusnya membuat derajat *supercooling* pada saat larutan membeku menjadi turun. Namun referensi lain mengatakan bahwa hal ini dapat pula terjadi karena pada beberapa penelitian ditemukan bahwa derajat *supercooling* hanya dipengaruhi oleh laju pendinginan, volume dan laju pembentukan dendritnya. Ribeiro dkk (2006) menjelaskan dalam jurnalnya bahwa derajat *supercooling* akan meningkat saat terjadi peningkatan laju pertumbuhan dendrit. Pengaruh lainnya juga dijelaskan oleh Wilson (2012) bahwa derajat *supercooling* dapat berbeda tergantung pada volume dan laju pendinginannya.

Komposisi garam klorida justru memberikan pengaruh terhadap penurunan titik beku larutan sesuai dengan sifat koligatif air. Hal ini sesuai juga dengan penjelasan Chaplin (2007) bahwa pada temperatur rendah, ikatan hidrogen pada H₂O akan melemah sehingga molekul air akan tidak stabil dan menjadikannya padat. Namun penambahan zat terlarut dapat membuat ikatan hidrogen tersebut teratur kembali sehingga titik beku larutan akan semakin turun. Hal ini dipengaruhi oleh Massa Relatif (Mr) dan faktor Van Hoff yang dimiliki oleh tiap jenis garam klorida. Perhitungan penurunan titik beku larutan ditampilkan dalam lampiran 1. Namun pada penelitian ini terdapat perbedaan hasil antara titik beku dengan perhitungan dan hasil penelitian. Hal ini dapat dikarenakan tidak murninya bahan garam klorida yang digunakan sehingga terdapat bahan lain yang mempengaruhi molalitas zat terlarut. Selain itu jenis garam klorida juga diketahui mempengaruhi laju peleburan es yang terbentuk. Yatsenko dkk (2002) menjelaskan bahwa laju peleburan bervariasi secara sistematis dengan perubahan radius kation dan koefisien eutektik dari larutan air dan garam. Semakin tinggi koefisien eutektik atau semakin menurun



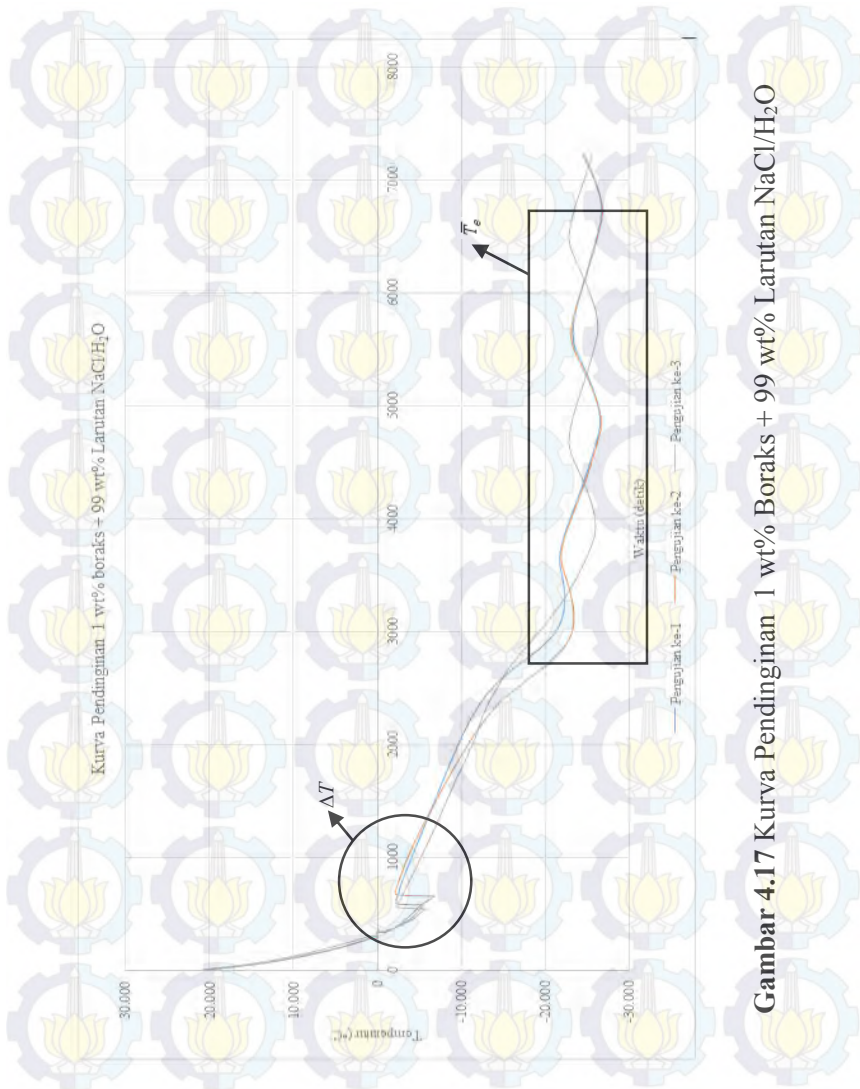
radius kation maka laju peleburannya semakin meningkat. Dalam jurnal tersebut dijelaskan bahwa NaCl , NH_4Cl dan MgCl_2 memiliki radius kation (R_c dalam nm) berturut-turut 0,098; 0,143 dan 0,074 sedangkan koefisien eutektiknya berturut-turut 2,48; 1,979 dan 7,84. Menurut hasil penelitian tersebut, es hasil pembekuan larutan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ diketahui memiliki laju peleburan 0,3 – 0,5 ml/min untuk konsentrasi garam di bawah 10 wt %. Secara teori dapat dijelaskan bahwa larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ akan memiliki laju peleburan di atas laju peleburan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ sedangkan larutan NH_4Cl memiliki laju peleburan di bawah laju peleburan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$. Maka apabila diketahui larutan garam-air saat pengujian adalah 15 mL maka proses peleburan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ padat dengan konsentrasi 2-8 wt% berkisar antara 30 – 50 menit. Hal ini menandakan peleburan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ akan berlangsung lebih cepat dan peleburan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ akan berlangsung lebih lama. Sebagai data tambahan, perhitungan waktu peleburan untuk $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ dijelaskan pada lampiran 2. Proses peleburan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ padat hingga cair sempurna dengan konsentrasi 2-8 wt% tercatat pada kisaran 30 menit. Hal ini sesuai dengan penjelasan sebelumnya.

IV.2 Analisis Hasil *Chamber Test* Larutan Eutektik Garam Klorida/ H_2O dengan Penambahan Agen Nukleasi

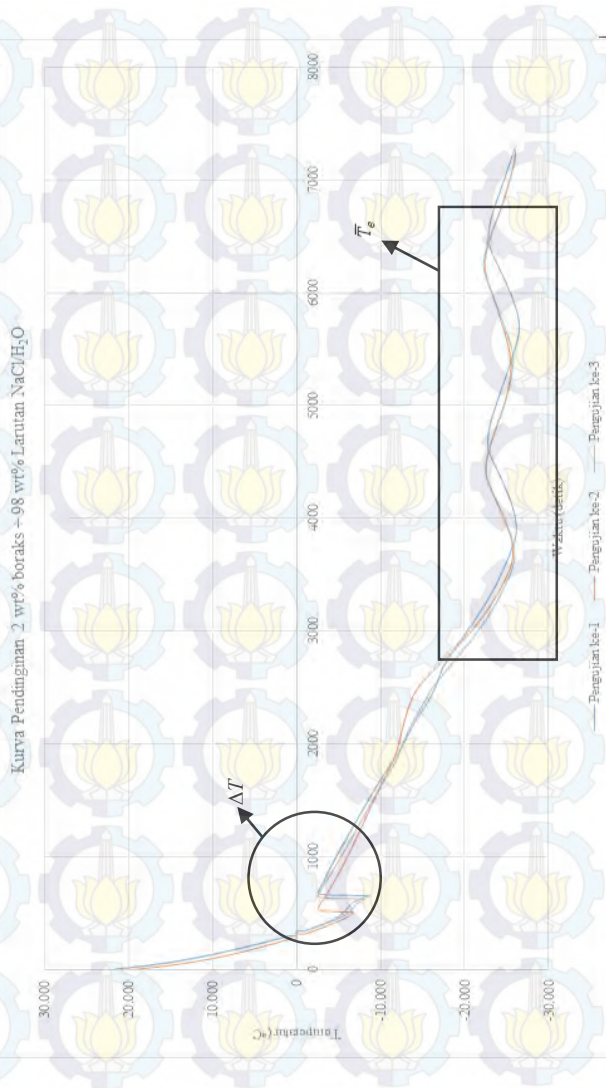
Pengujian *Chamber Test* pada larutan 2 wt% garam klorida/ H_2O dengan penambahan agen nukleasi berupa boraks dilakukan untuk mengetahui pengaruh agen nukleasi tersebut terhadap derajat *supercooling* berdasarkan kurva pendinginannya.

a. Analisis Larutan $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$

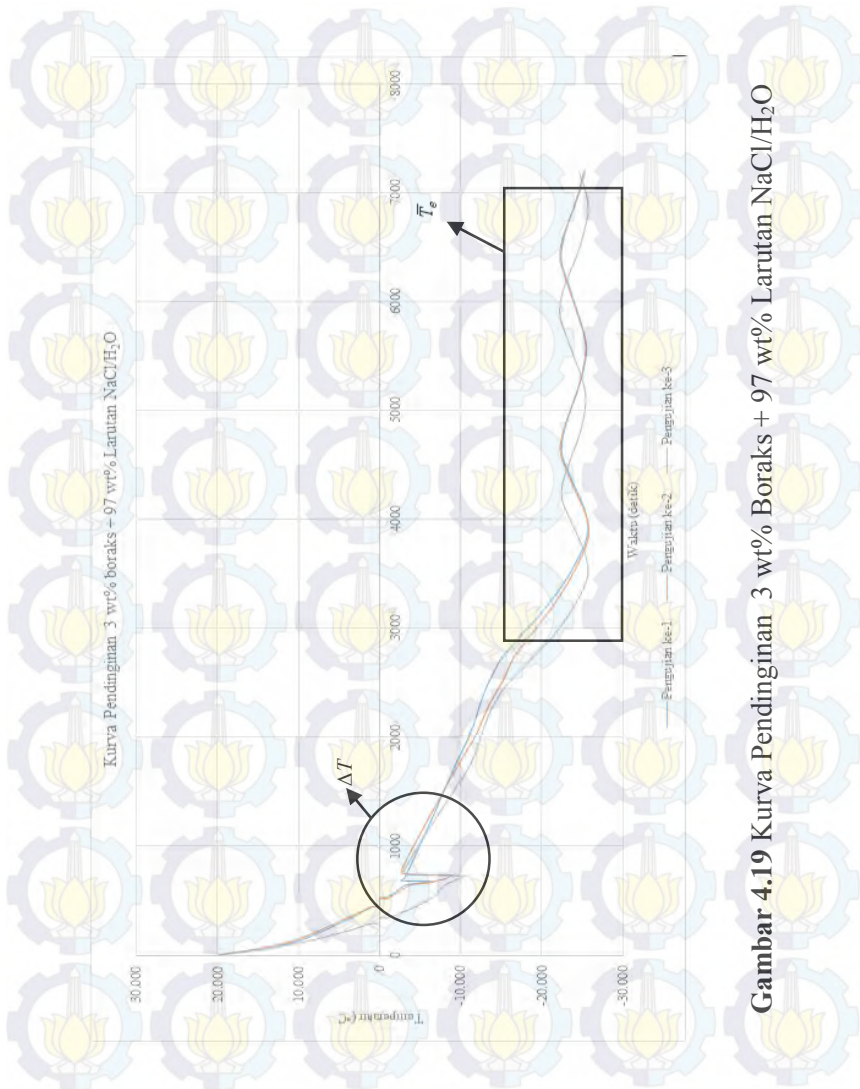
Kurva pendinginan larutan 2 wt% $\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1%, 2% dan 3% boraks ditampilkan dalam Gambar 4.17 hingga 4.19 . Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.4 untuk dibandingkan.



Gambar 4.17 Kurva Pendinginan 1 wt% Boraks + 99 wt% Larutan NaCl/H₂O



Gambar 4.18 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan NaCl/H₂O



Gambar 4.19 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan NaCl/H₂O



Tabel 4.4 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan NaCl/H₂O Setelah Penambahan Agen Nukleasi

Komposisi Boraks	Uji ke-	T _f (°C)	T _c (°C)	ΔT (°C)	T _e (°C)
0 wt% Boraks	1	-3,75	-4,75	1,00	-21,88
	2	-2,00	-7,69	5,69	-24,44
	3	-2,00	-8,25	6,25	-24,63
	\bar{x}	-2,58	-6,90	4,31	-23,65
	Δx	1,01	1,88	2,88	1,54
1 wt% Boraks	1	-2,31	-5,44	3,13	-22,25
	2	-2,25	-6,75	4,50	-23,38
	3	-3,00	-5,69	2,69	-25,88
	\bar{x}	-2,52	-5,96	3,44	-23,83
	Δx	0,42	0,70	0,94	1,86
2 wt% Boraks	1	-2,88	-8,50	5,63	-26,06
	2	-3,31	-6,63	3,31	-25,63
	3	-3,00	-8,82	5,82	-25,94
	\bar{x}	-3,06	-7,98	4,92	-25,88
	Δx	0,22	1,18	1,40	0,22
3 wt% Boraks	1	-2,81	-6,64	3,82	-25,63
	2	-3,13	-8,94	5,81	-25,63
	3	-3,50	-10,56	7,06	-25,50
	\bar{x}	-3,15	-8,71	5,57	-25,58
	Δx	0,35	1,97	1,63	0,08

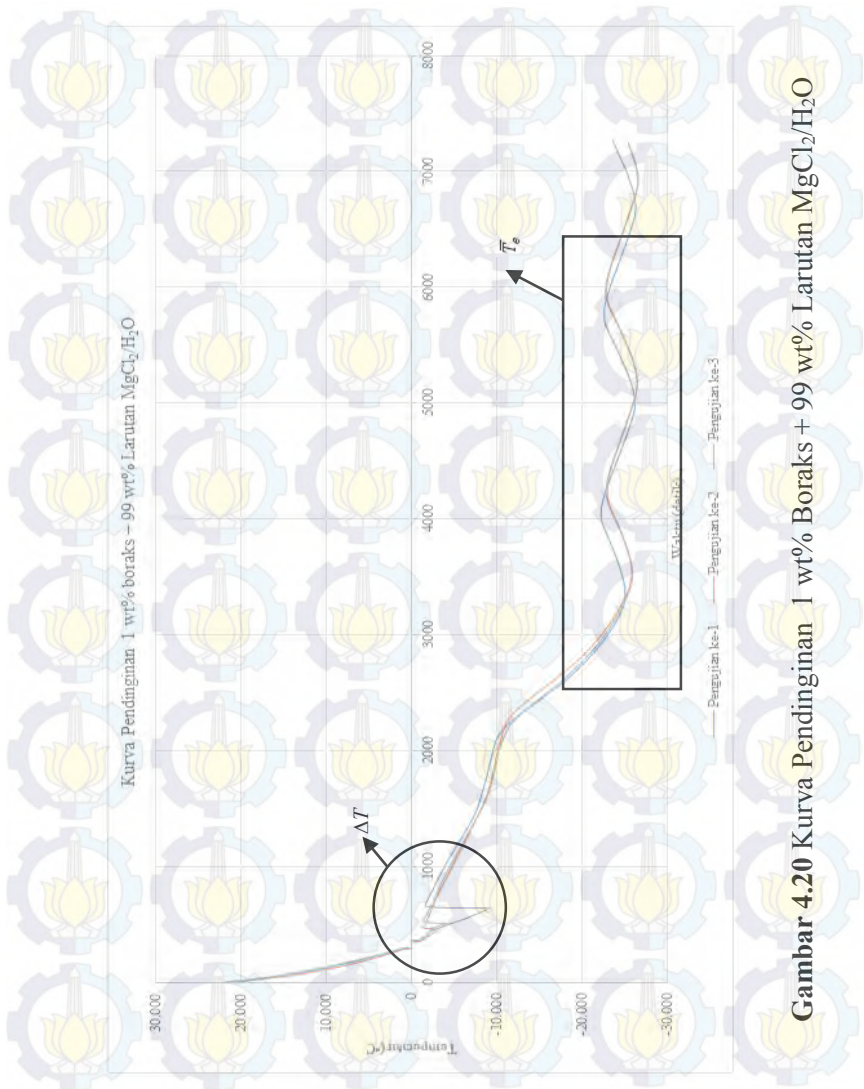
Berdasarkan Tabel 4.4 tersebut dapat diketahui temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa penambahan agen nukleasi yaitu boraks. Larutan dengan komposisi 0 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,58 \pm 1,01)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-23,65 \pm 1,54)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,31 \pm 2,88)^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 1 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,52 \pm 0,42)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-23,83 \pm 1,86)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(3,44 \pm 0,94)^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 2 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-3,06 \pm 0,22)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-25,88 \pm 0,22)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,92 \pm 1,40)^{\circ}\text{C}$. Larutan dengan komposisi 3 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-3,15 \pm 0,35)^{\circ}\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-25,58 \pm 0,08)^{\circ}\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(5,57 \pm 1,63)^{\circ}\text{C}$. Penambahan 1 wt%

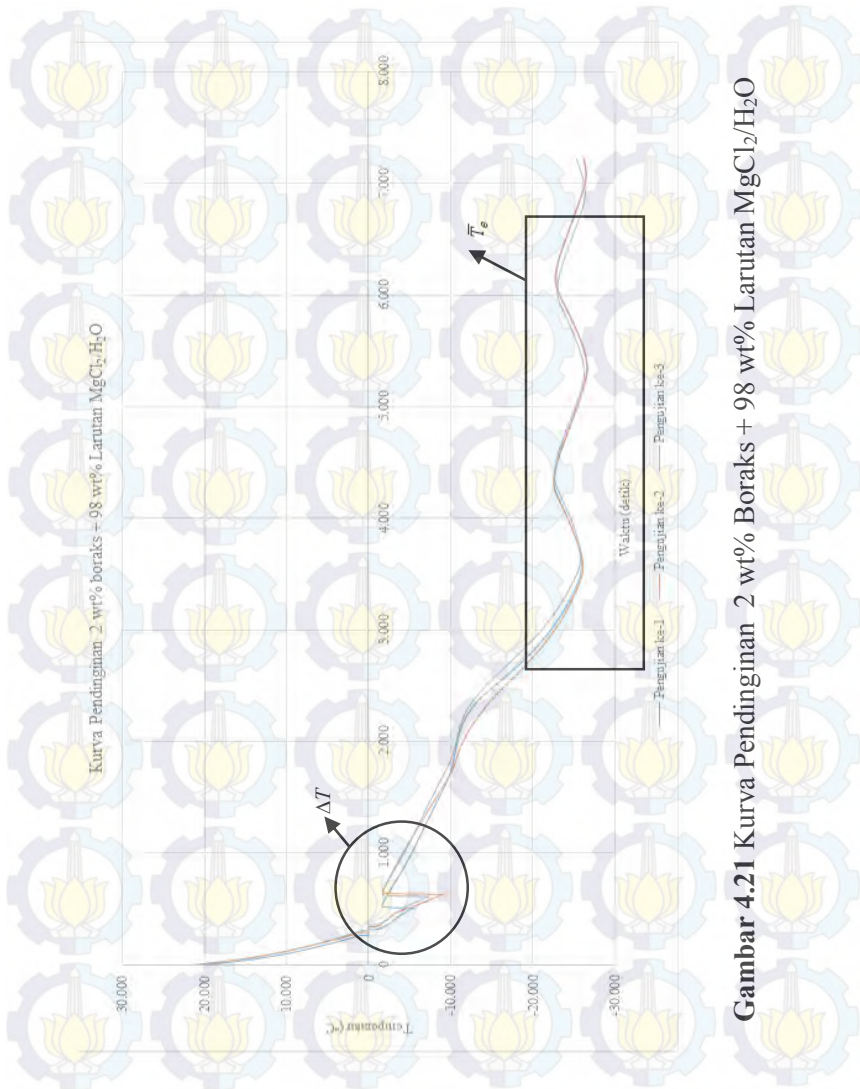


boraks memberikan penurunan derajat *supercooling* dari $(4,31 \pm 2,88)^\circ\text{C}$ menjadi $(3,44 \pm 0,94)^\circ\text{C}$. Namun penambahan 2 wt% dan 3 wt% justru menaikkan derajat *supercooling*. Selain itu penambahan boraks justru tercatat menurunkan temperature eutektiknya.

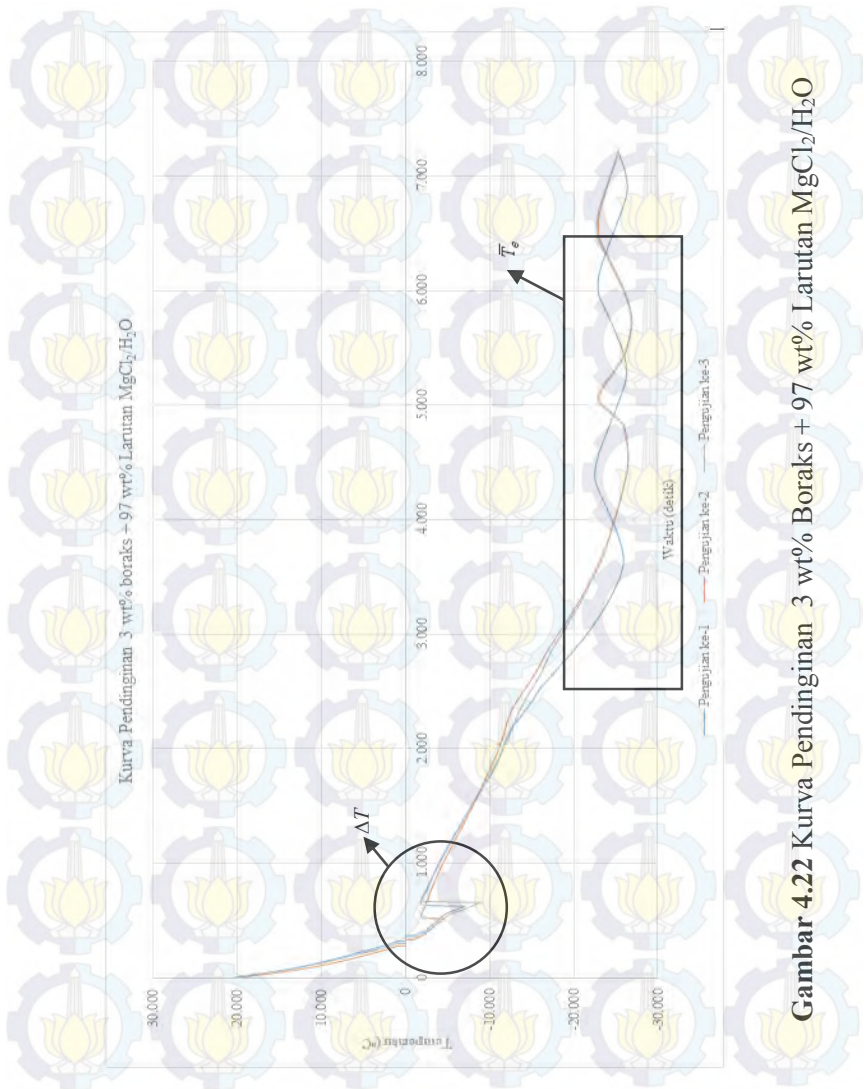
b. Analisis Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$

Kurva pendinginan larutan 2 wt% $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1%, 2% dan 3% boraks ditampilkan dalam Gambar 4.20 hingga 4.22 . Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.5 untuk dibandingkan.





Gambar 4.21 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan $MgCl_2/H_2O$



Gambar 4.22 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$



Tabel 4.5 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ Setelah Penambahan Agen Nukleasi

Komposisi Boraks	Uji ke-	T_f (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	\bar{T}_e (°C)
0 wt% Boraks	1	-1,19	-3,13	1,94	-19,63
	2	-1,44	-6,19	4,75	-22,75
	3	-1,31	-4,69	3,38	-25,63
	\bar{x}	-1,31	-4,67	3,35	-22,67
	Δx	0,13	1,53	1,41	3,00
1 wt% Boraks	1	-2,06	-9,06	7	-25,06
	2	-1,88	-3,13	1,25	-25,81
	3	-2,13	-4,13	2	-25,88
	\bar{x}	-2,02	-5,44	3,42	-25,58
	Δx	0,13	3,17	3,13	0,45
2 wt% Boraks	1	-2,38	-5,50	3,13	-25,94
	2	-1,81	-8,81	7,00	-26,13
	3	-2,06	-7,13	5,06	-25,81
	\bar{x}	-2,08	-7,15	5,06	-25,96
	Δx	0,29	1,66	1,94	0,16
3 wt% Boraks	1	-2,31	-7,06	4,75	-25,88
	2	-2,38	-4,56	2,19	-26,50
	3	-2,38	-8,75	6,38	-26,44
	\bar{x}	-2,35	-6,79	4,44	-26,27
	Δx	0,04	2,11	2,11	0,34

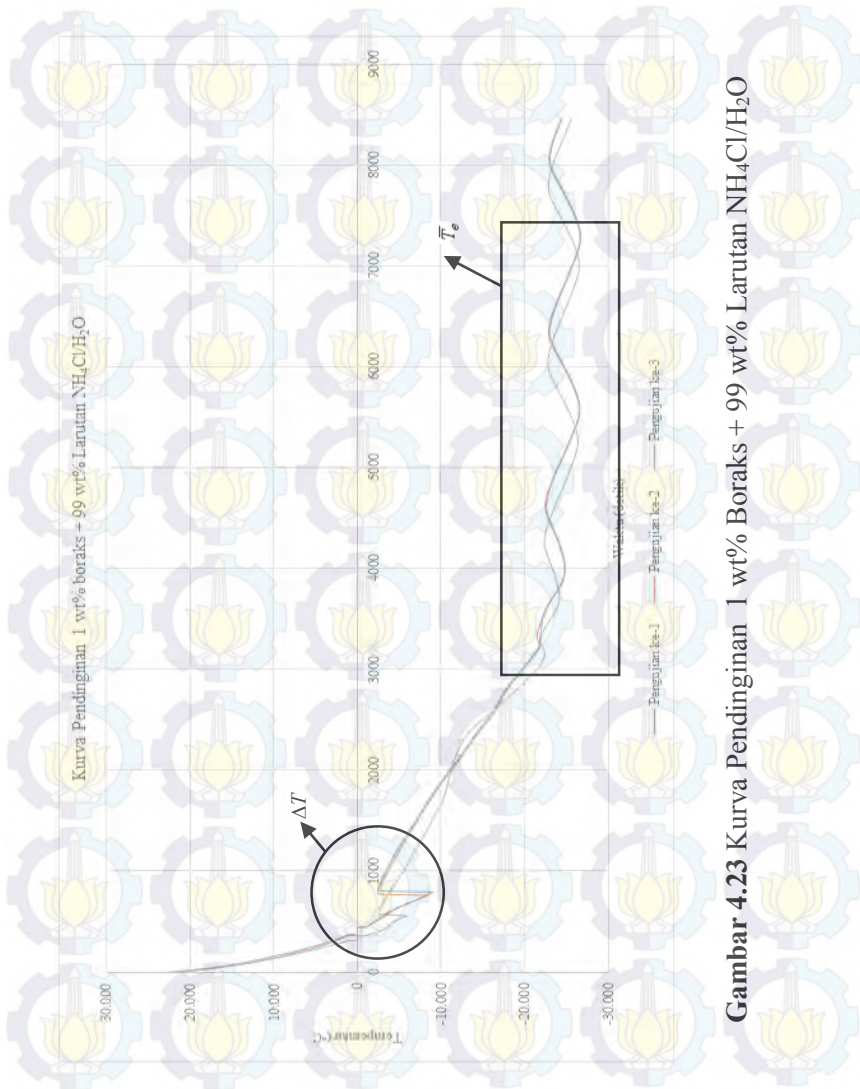
Berdasarkan Tabel 4.5 tersebut dapat diketahui temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa penambahan agen nukleasi yaitu boraks. Larutan dengan komposisi 0 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-1,31 \pm 0,13)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-22,67 \pm 3,00)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(3,35 \pm 1,41)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 1 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,02 \pm 0,13)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-25,58 \pm 0,45)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(3,42 \pm 3,13)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 2 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,08 \pm 0,29)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-25,95 \pm 0,16)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(5,06 \pm 1,94)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 3 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,35 \pm 0,04)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-26,27 \pm 0,34)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,44 \pm 2,11)^\circ\text{C}$. Penambahan 1 hingga



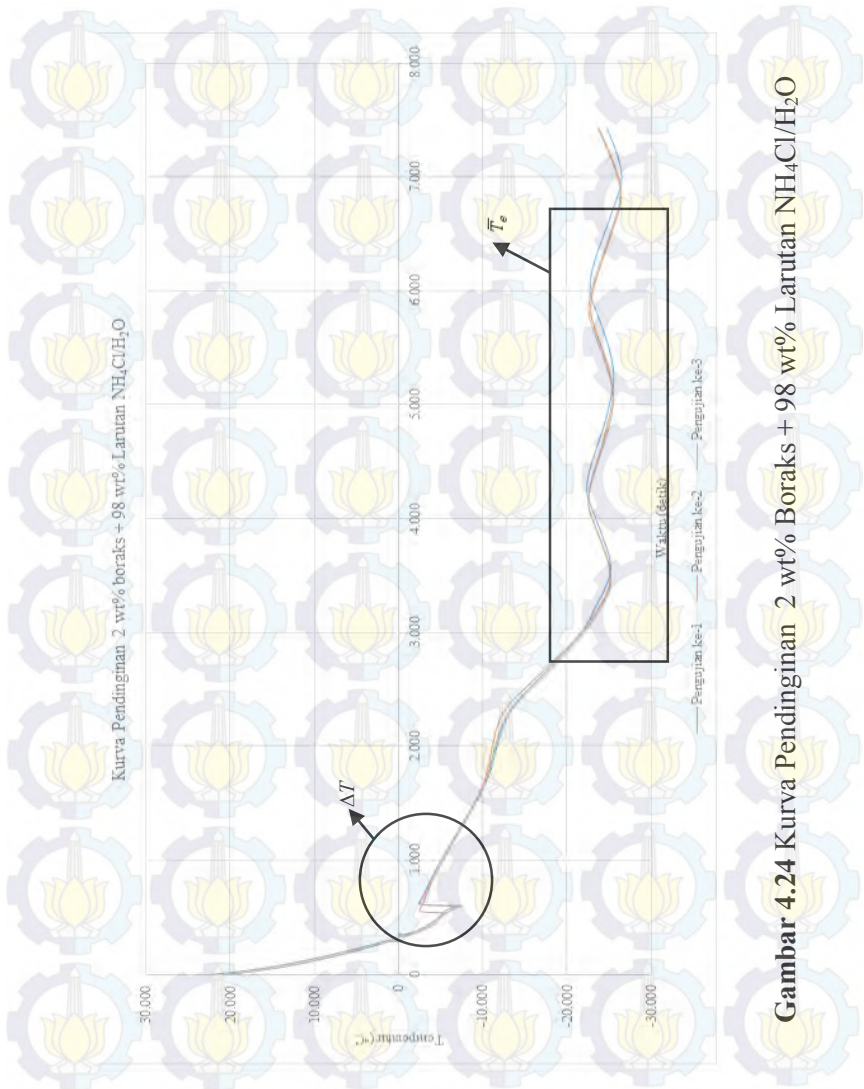
3 wt% boraks tidak memberikan penurunan derajat *supercooling* dari larutan $\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$. Penambahan boraks justru tercatat menurunkan temperatur eutektiknya.

c. Analisis Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$

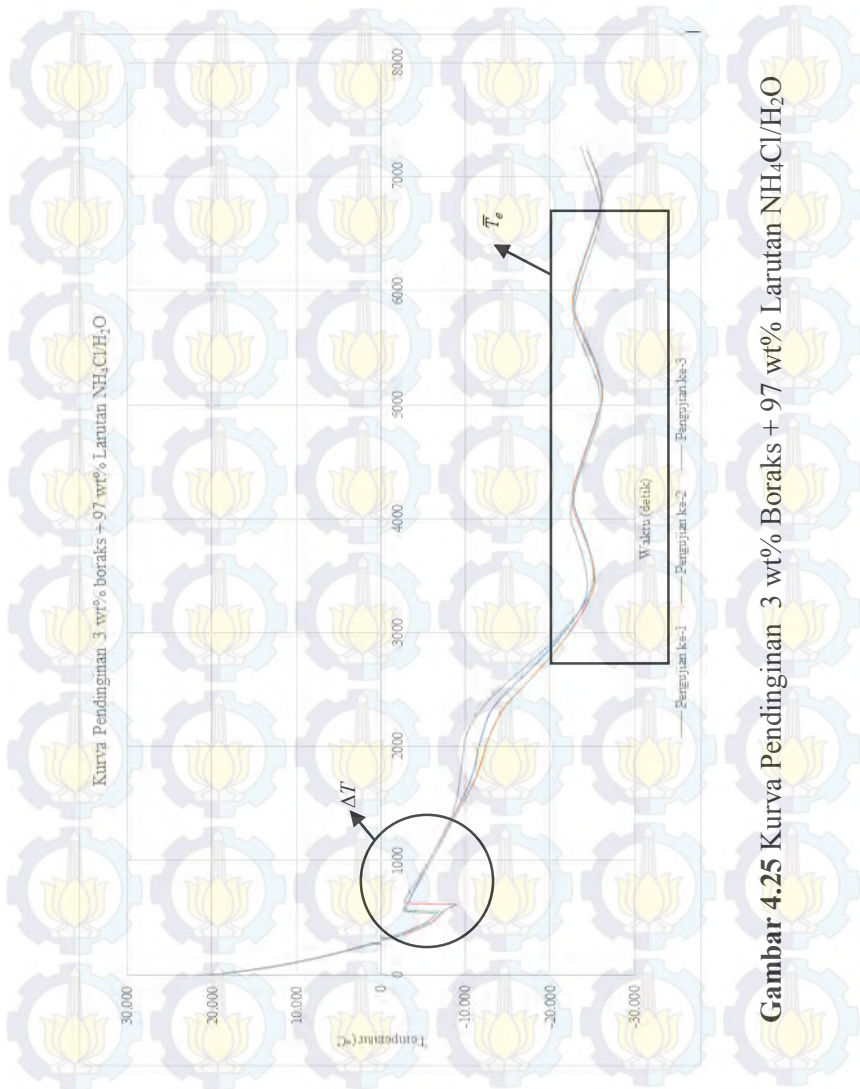
Kurva pendinginan larutan 2 wt% $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ dengan penambahan 1%, 2% dan 3% boraks ditampilkan dalam Gambar 4.23 hingga 4.25 . Hasil pembacaan kurva pendinginan tersebut kemudian ditampilkan dalam Tabel 4.6 untuk dibandingkan.



Gambar 4.23 Kurva Pendinginan 1 wt% Boraks + 99 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$



Gambar 4.24 Kurva Pendinginan 2 wt% Boraks + 98 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$



Gambar 4.25 Kurva Pendinginan 3 wt% Boraks + 97 wt% Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$



Tabel 4.6 Hasil Pembacaan Kurva Pendinginan Larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$ Setelah Penambahan Agen Nukleasi

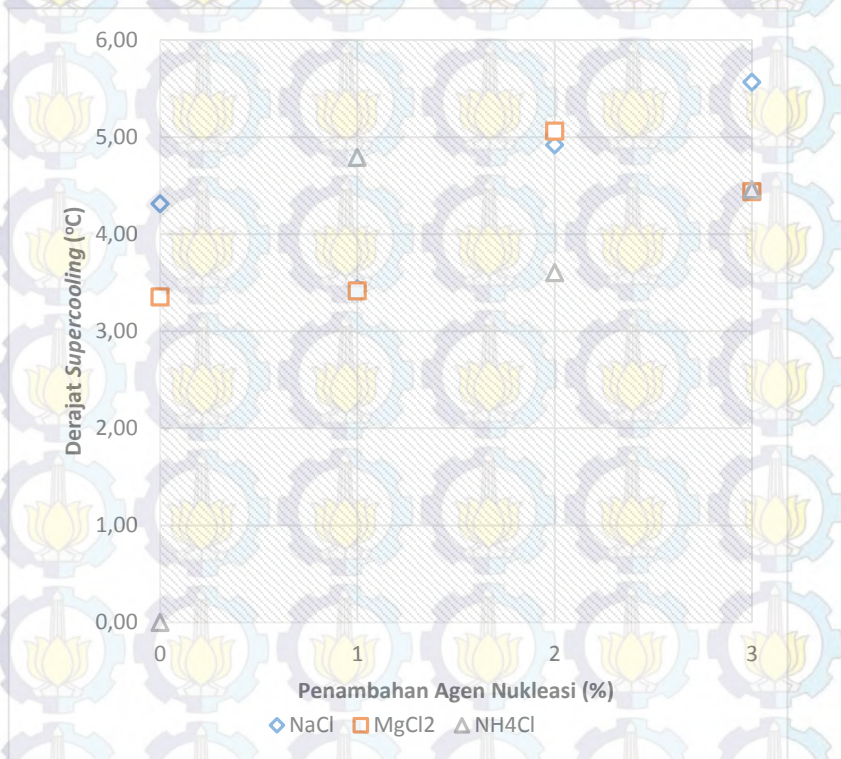
Komposisi Boraks	Uji ke-	$T_f (^\circ\text{C})$	$T_c (^\circ\text{C})$	$\Delta T (^\circ\text{C})$	$\bar{T}_e (^\circ\text{C})$
0 wt% Boraks	1	-2,00	-2,00	0,00	-16,88
	2	-2,75	-2,75	0,00	-17,63
	3	-2,31	-2,31	0,00	-17,25
	\bar{x}	-2,35	-2,35	0,00	-17,25
	Δx	0,38	0,38	0,00	0,38
1 wt% Boraks	1	-2,81	-8,94	6,125	-21,94
	2	-3,00	-8,38	5,375	-21,81
	3	-3,00	-5,88	2,875	-22,50
	\bar{x}	-2,94	-7,73	4,79	-22,08
	Δx	0,11	1,63	1,70	0,37
2 wt% Boraks	1	-2,75	-6,81	4,06	-25,13
	2	-3,00	-5,44	2,44	-25,06
	3	-3,19	-7,50	4,31	-25,19
	\bar{x}	-2,98	-6,58	3,60	-25,13
	Δx	0,22	1,05	1,02	0,07
3 wt% Boraks	1	-3,25	-6,69	3,44	-25,06
	2	-2,81	-8,81	6,00	-25,25
	3	-3,25	-7,19	3,94	-24,44
	\bar{x}	-3,10	-7,56	4,46	-24,92
	Δx	0,25	1,11	1,36	0,42

Berdasarkan Tabel 4.6 tersebut dapat diketahui temperatur beku, rata-rata temperatur eutektik dan derajat *supercooling* pada beberapa penambahan agen nukleasi yaitu boraks. Larutan dengan komposisi 0 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,35 \pm 0,38)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-17,25 \pm 0,38)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada 0°C . Larutan dengan komposisi 1 wt% boraks memiliki rata-rata temperatur beku $(-2,94 \pm 0,11)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-22,08 \pm 0,37)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,79 \pm 1,70)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 2 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-2,98 \pm 0,22)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-25,13 \pm 0,07)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(3,60 \pm 1,02)^\circ\text{C}$. Larutan dengan komposisi 3 wt% boraks memiliki temperatur beku $(-3,10 \pm 0,25)^\circ\text{C}$ dan rata-rata temperatur eutektik $(-24,92 \pm 0,42)^\circ\text{C}$. Derajat *supercooling* tercatat pada $(4,46 \pm 1,36)^\circ\text{C}$. Hal ini menandakan



bahwa penambahan 1 hingga 3 wt% boraks justru memberikan peningkatan derajat *supercooling* dari larutan $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$. Penambahan boraks justru tercatat menurunkan temperatur eutektiknya.

Berdasarkan hasil analisis data tersebut maka perubahan derajat *supercooling* di setiap jenis larutan garam klorida setelah penambahan agen nukleasi dapat ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.26 Derajat *Supercooling* Larutan 2 wt% Garam Klorida + 98 wt% H_2O Setelah Penambahan Agen Nukleasi



Penambahan agen nukleasi bertujuan untuk mempercepat proses nukleasi yang terjadi dan hal ini ditandai dengan kecilnya derajat *supercooling* yang terjadi. Zhang dkk (2014) menjelaskan bahwa agen nukleasi ini digunakan sebagai bibit atau katalis untuk proses nukleasi dan pertumbuhan kristal. Hipotesis ini disesuaikan juga dengan penjelasan Ozgul (2006) bahwa penambahan agen nukleasi khususnya boraks dengan komposisi 1 – 2 wt% pada garam jenis glauber dapat memberikan pencegahan terhadap derajat *supercooling*. Namun pada penelitian ini penambahan agen nukleasi hanya berpengaruh terhadap penurunan derajat *supercooling* larutan NaCl/H₂O sebesar 0,87°C dengan 1 wt% boraks seperti pada Gambar 4.26. Selebihnya penambahan agen nukleasi justru menaikkan derajat *supercooling* tersebut.

Hasil ini menandakan bahwa ada faktor lain yang dapat mempengaruhi ketidaksesuaian hasil tersebut. Chen dkk (1999) menyebutkan bahwa dalam penelitiannya penambahan 1-10% agen nukleasi (bijih besi, *iron chips*, dan AgI) belum memberikan kenaikan temperatur nukleasi yang signifikan walaupun secara umum AgI dalam penelitian tersebut memberikan kenaikan temperatur nukleasi yang lebih tinggi dibanding agen nukleasi lainnya. Chen dkk (1999) menerangkan bahwa faktor yang menyebabkan adalah struktur kristal agen nukleasi. Struktur kristal ini harus sama atau mirip dengan struktur kristal es agar nukleasi terjadi secara homogen.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Komposisi garam klorida dalam larutan garam klorida/H₂O tercatat memberikan pola pengaruh yang berbeda terhadap derajat *supercooling* dan berkisar pada 0 – 5 °C. Namun komposisi tersebut memberikan pola pengaruh yang sama terhadap penurunan titik beku larutan sesuai dengan kenaikan molalitas zat terlarutnya.
2. Penambahan 1 wt% agen nukleasi pada NaCl/H₂O tercatat memberikan penurunan derajat *supercooling* sebesar 0,87°C. Namun penambahan agen nukleasi pada MgCl₂/H₂O dan NH₄Cl/H₂O tercatat justru memberikan kenaikan derajat *supercooling* sebesar 1 – 2 °C.

V.2 Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya pengujian pendukung lain seperti pengujian struktur mikro kristal yang terbentuk, pengujian panas laten, pengujian ikatan kimia yang terbentuk dan pengujian *Enviromental Chamber Test* yang terstandarisasi.
2. Perlu dilakukan penelitian sejenis dengan penambahan variasi jenis garam dengan temperatur beku yang lebih bawah, volume yang lebih besar, variasi pada laju perkembangan dendrit dan laju pendinginan yang lebih bervariasi agar derajat *supercooling* dapat dianalisis dengan lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaplin, Martin. 2010. *Water's Hydrogen Bond Strength*. Dalam: **Water and Life**, ed. R.M. Lynden-Bell, S. Conway Morris, J. D. Barrow, J. L. Finney and C. L. Harper, Jr. (CRC Press, Boca Raton, 2010) pp 69-86. arXiv:0706.1355 (2007).
- Chen, Ningjuan., Morikawa, Junko., dan Hashimoto, Toshimasa. 2005. *Effect of Cryoprotectants on Eutectic of NaCl-2H₂O/ice and KCl/Ice Studied by Temperature Wave Analysis and Differential Scanning Calorimetry*. **Thermochimica Acta**, 431, 106-112.
- Chen, Sih Li., Wang, Pong-Ping., dan Lee, Tzong-Shing. 1999. *An Experimental Investigation of Nucleation Probability of Supercooled Water Inside Cylindrical Capsules*. **Experimental Thermal and Fluid Science** 18 (1999) 299-306.
- Couper, James., Penney, W.Roy., Fair, James R., Walas, Stanley M. 2012. **Chemical Process Equipment Third Edition**. Oxford : Butterworth-Heinemann (Elsevier)
- Faghri, Amir dan Zhang, Yuwen. 2006. **Transport Phenomena in Multiphase Systems**. London : Academic Press (Elsevier)
- Gao, Daolin dan Deng, Tianlong. 2013. *Energy Storage: Preparations And Physicochemical Properties Of Solidliquid Phase Change Materials For Thermal Energy Storage*. **Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments**.
- Han, Bumsoo., Choi, Jeung Hwan., Dantzig, Jonathan A., dan Bischof, John C. 2006. *A quantitative analysis on latent heat of an aqueous binary mixture*. **Cryobiology** 52 (2006) 146-151
- Hou, Yawei., Gu, Yingying., Zhang, Sumei., Yang, Fan., Ding, Hanming dan Shan, Yongkui. 2008. *Novel Binary Eutectic*

- Mixtures Based On Imidazole. Journal of Molecular Liquids*, 143, 154-159.
- JSME Data Book Thermophysical Properties of Fluid* (1983).
- Kipouros, George J., dan Sadoway, Donald R. *Thermochemical Analysis of The Production of Anhydrous $MgCl_2$. Journal of Light Metal 2001, Elsevier.*
- Li, Gang., Hwang, Yunho., Radermacher, Reinhard dan Chun, Hohwan. 2013. *Review Of Cold Storage Materials For Subzero Applications. Journal of Energy 51 (2013) 1-17*
- Liu, Ming., Bruno, Frank, dan Saman, Wasim. 2006. *Development of a Low-cost Phase Change Material for Refrigerated Vehicles*. Australis ANZSES 2006.
- Lu, W., dan Tassou, S.A. 2013. *Characterization and Experimental Investigation of Phase Change Material for Chilled Food Refrigerated Cabinet Applications. Journal of Applied Energy 112 (2013) 1376-1382.*
- Mehling, Harald., dan Cabeza, Luisa F. 2008. *Heat And Cold Storage With PCM: An Up To Date Introduction Into Basics And Applications*. Berlin : Springer.
- Milisic, Edina. 2013. *Modelling of Energy Storage Using Phase-Change Materials (PCM Materials)*. Norwegia : Norwegia University.
- Mortimer, Robert G. 2008. *Physical Chemistry Third Edition*. Canada: Elsevier Academic Press.
- Ozgur dkk. 2006. *Stabilization of Glauber's salt for latent heat Storage*. Dalam **Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage—Ecstock 2006**.
- Patnaik, Pradyot. 2002. *Handbook of Inorganic Chemicals*. Amerika Serikat : McGraw-Hill Companies, Inc.
- Ribeiro dkk. 2006. *Thermal and Dynamic Study of Water Crystallization at The Supercooling Breakdown. Journal of Electron Devices, Vol 4 2006 pp 97-100.*
- Sharma, Atul., Tyagi, V.V., Chen, C.R., dan Buddhi, D. 2007. *Review on Thermal Energy Storage With Phase Change*

Materials and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318-345.

Stewart, K.M. 2009. ***Physical Properties of Water***. Amerika Serikat : Elsevier, Inc.

Tan, Kah-Cye., dan Ho, Wenxian . 2014. ***A Study of the Occurance of Supercooling of Water***. Cornell University Library.

Wilson, Peter. 2012. **Supercooling**. Croatia: In Tech.

Yatsenko, O.B dan Chudotvortsev, I.G. 2002. *Ice Melting and Crystallization in Binary Water-Salt Systems*. **Inorganic Materials, Vol. 38 No. 9, 2002 pp 907-913.**

Zhang, Xiyao., Niu, Jianlei., Wu, Jianyong., dan Zhang Shuo. 2014. *The Study of Paraffin-Water Emulsion PCM with Low Sueprcooling Degree*. **Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning 2014.**



LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Penurunan Titik Beku berdasarkan Sifat Koligatif Larutan.

Persamaan sifat koligatif larutan :

$$\Delta T_f = K_f \cdot m \cdot i$$

dimana :

ΔT_f adalah penurunan titik beku ($^{\circ}\text{C}$)

K_f adalah konstanta penurunan titik beku (pada air sebesar 1,86)

M adalah molalitas zat terlarut (mol/kg larutan)

i adalah faktor Van Hoff

Tabel 1. Perhitungan Penurunan Titik Beku Larutan

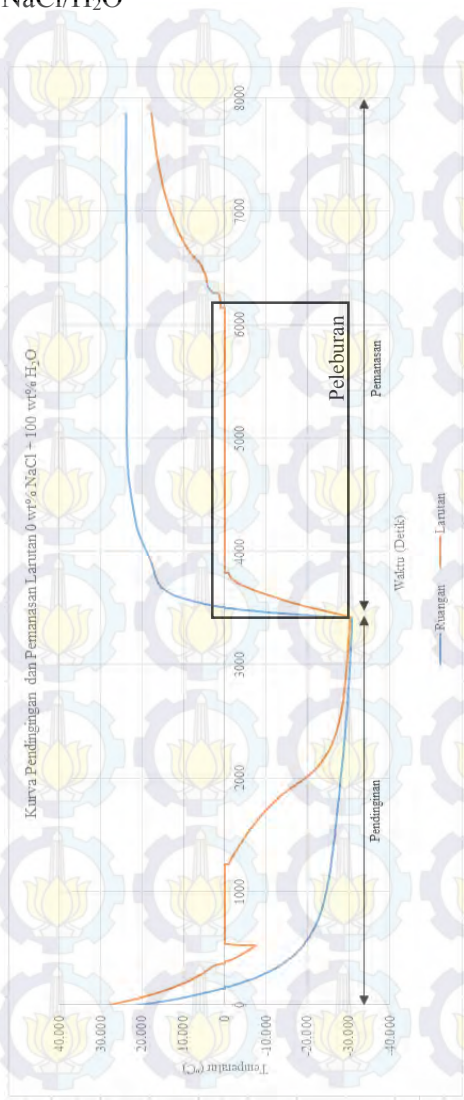
No	Zat terlarut	Mr	Faktor Van Hoff (i)	Masa larutan		2 wt% garam		4 wt% garam		6 wt% garam		8 wt% garam	
				kg	gr	massa garam (gr)	ΔT_f	massa garam (gr)	ΔT_f	massa garam (gr)	ΔT_f	massa garam (gr)	ΔT_f
1	NH ₄ Cl	53,50	2,00	0,10	100,00	2,00	1,39	4,00	2,78	6,00	4,17	8,00	5,56
2	MgCl ₂	95,30	3,00	0,10	100,00	2,00	1,17	4,00	2,34	6,00	3,51	8,00	4,68
3	NaCl	58,50	2,00	0,10	100,00	2,00	1,27	4,00	2,54	6,00	3,82	8,00	5,09

Tabel 2. Perbandingan Hasil Perhitungan dengan Hasil Pengujian Titik Beku Larutan

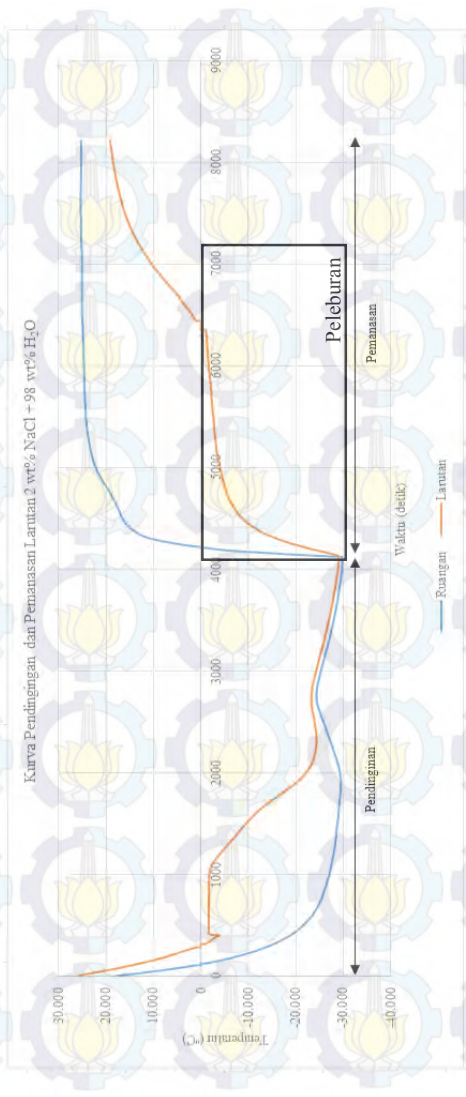
No	Zat Terlarut	wt % garam	ΔT_f Perhitungan ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_f Pengujian ($^{\circ}\text{C}$)	Error (%)	Error rata-rata (%)
1	NH ₄ cl	2	1,39	2,35	69,06	28,98
		4	2,78	3,38	21,58	
		6	4,17	4,94	18,47	
		8	5,56	5,94	6,83	

2	MgCl ₂	2	1,17	1,31	11,97	20,69
		4	2,34	2,19	6,41	
		6	3,51	2,6	25,93	
		8	4,68	2,88	38,46	
3	NaCl	2	1,27	2,58	103,15	49,96
		4	2,54	3,5	37,80	
		6	3,82	4,75	24,35	
		8	5,09	6,85	34,58	

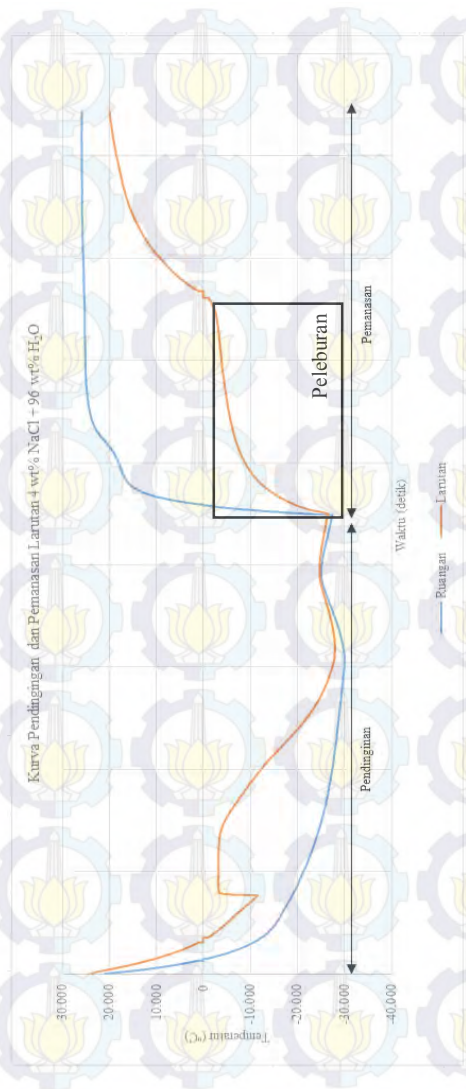
Lampiran 2. Data Tambahan Pengujian Waktu Peleburan pada Larutan NaCl/H₂O



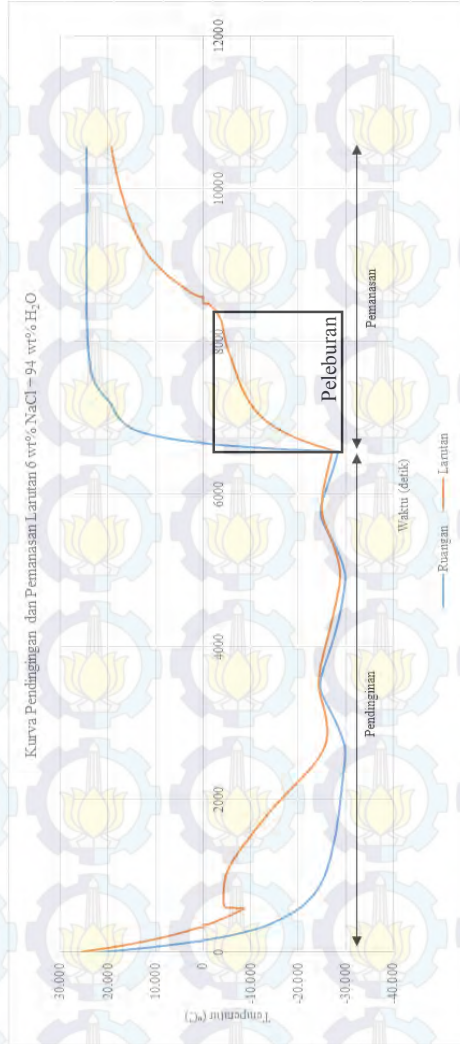
Gambar 1. Kurva Pendinginan dan Pemanasan Larutan 0 wt% NaCl + 100% H₂O



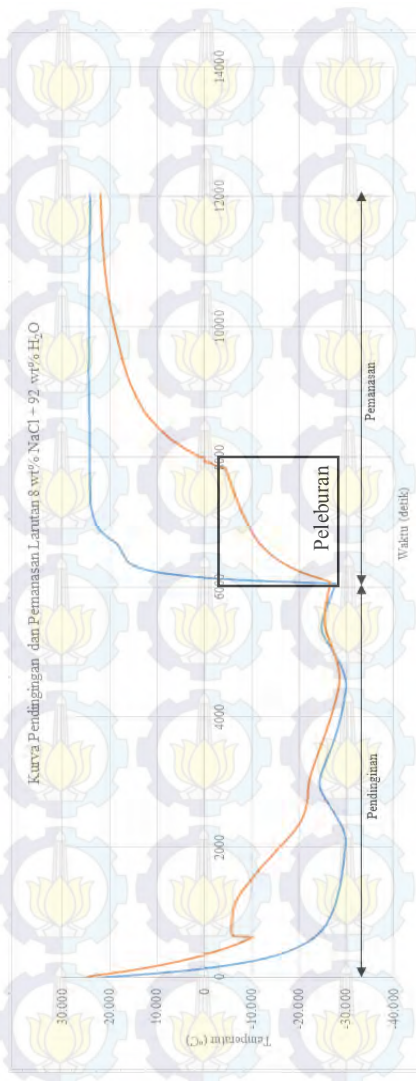
Gambar 2. Kurva Pendinginan dan Pemanasan Larutan 2 wt% NaCl + 98% H₂O



Gambar 3. Kurva Pendinginan dan Pemanasan Larutan 4 wt% NaCl + 96% H₂O



Gambar 4. Kurva Pendinginan dan Pemanasan Larutan 6 wt% NaCl + 94% H₂O



Gambar 5. Kurva Pendinginan dan Pemanasan Larutan 8 wt% NaCl + 92% H₂O

Tabel 3. Perhitungan Waktu Peleburan pada larutan NaCl/H₂O

Komposisi NaCl	Temperatur		Waktu		Waktu Peleburan	
	Awal (Padat)	Akhir (Cair)	Detik Awal (Padat)	Detik Akhir (Cair)	(detik)	(menit)
0 wt %	-30,188	-1	3408	6137	2729	45,48
2 wt %	-28,938	-1,125	4129	6321	2192	36,5
4 wt %	-26,438	-2,625	4491	6457	1966	32,76
6 wt %	-27,125	-3,875	6568	8262	1694	28,23
8 wt %	-25,5	-4,5	6103	7802	1699	28,31

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jember, 28 Juni 1993, merupakan putra kedua dari pasangan bapak Birsono dan Ibu Sriken Tulastari. Penulis telah menempuh pendidikan formal antara lain di TK Harapan Pringgowirawan, SDN Pringgowirawan II, SMPN 3 Tanggul, dan SMAN 1 Jember. Setelah lulus dari SMAN tahun 2012, penulis diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS di tahun yang sama dan terdaftar dengan Nomor Registrasi Pokok 2712100047.

Semasa kuliah penulis pernah aktif di BEM ITS dan Klub Keilmiahan ITS. Selain itu penulis juga aktif sebagai Grader Metalurgi pada tahun 2014-2015. Dalam tugas akhir ini, penulis mengambil bidang Material Inovatif dengan topik *Phase Change Material* yang terbilang topik baru di lingkungan jurusan Teknik Material dan Metalurgi.